

NAMUR
1959

4

Cybernetica

ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CYBERNÉTIQUE
INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR CYBERNETICS

Sous la Présidence d'honneur de M. le Gouverneur de la Province de Namur

Conseil d'Administration
Board of Administration

PRÉSIDENT :

M. Georges R. BOULANGER (Belgique), Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons et à l'Université Libre de Bruxelles.

MEMBRES :

MM. René CLOSE (Belgique), Avocat.

Louis COUFFIGNAL (France), Inspecteur Général de l'Instruction Publique, Directeur du Laboratoire de Calcul Mécanique de l'Institut Blaise Pascal, Paris.

John DIEBOLD (U.S.A.), President of John Diebold and Associates, Inc., New York.

W. Grey WALTER (United Kingdom), Sc.D., Burden Neurological Institute, Bristol.

ADMINISTRATEUR-DÉLÉGUÉ :

M. Josse LEMAIRE (Belgique), Directeur de l'Office Économique, Social et Culturel de la Province de Namur.

CYBERNETICA

est la revue de l'Association Internationale de Cybernétique.

Elle paraît 4 fois par an.

is the review of the International Association for Cybernetics.

It is issued four times a year.

Prix et conditions de vente -- Price and conditions of sale.

Abonnement annuel — *Yearly subscription :*

membres de l'Association	150,- F. B.
<i>members of the Association</i>	150,- F. B.
non-membres :	300,- F. B.
<i>non-members :</i>	300,- F. B.

Par numéro — *Each number :*

membres de l'Association	50,- F. B.
<i>members of the Association</i>	50,- F. B.
non-membres :	100,- F. B.
<i>non-members :</i>	100,- F. B.

Toute correspondance concernant la revue est à adresser à l'Association Internationale de Cybernétique, 13, rue Basse Marcelle, Namur (Belgique).

All correspondence concerning the review is to be sent to the International Association for Cybernetics, 13, rue Basse Marcelle, Namur (Belgium).

Secrétaire de Rédaction : M. Roger DETRY

CYBERNETICA

VOLUME II

N° 4 - 1959

Revue de l'Association Internationale de Cybernétique

Review of the International Association for Cybernetics

NAMUR

Les articles sont rédigés en français ou en anglais au choix de leurs auteurs. Ils n'engagent que ces derniers.

La reproduction intégrale ou abrégée des textes parus dans la revue est interdite sans autorisation spéciale de l'Association Internationale de Cybernétique.


The papers are written in English or in French according to the choice of their authors and on their own responsibility.

The complete or the partial reproduction of the papers printed in the review is forbidden without special authorization of the International Association for Cybernetics.

SOMMAIRE

CONTENTS

V. A. ILLYN : <i>Some aspects of Cybernetics</i>	203
P. NAYRAC : <i>La physique moderne et le problème des engrammes</i>	215
H. LABORIT : <i>Schématisation de la régulation de la pression artérielle</i> ..	236
N. A. ARMSTRONG : <i>Eventual full automation of pipelines</i>	250



Digitized by the Internet Archive
in 2024

Some aspects of Cybernetics

by V. A. ILLYN,

Academy of Sciences, Moscow

Modern science is characteristic of intensive development of fields of knowledge which are situated on the boundaries of separate scientific disciplines that study the processes concurrently present in physics, chemistry, biology, astronomy, etc... or in several different fields. It also concerns the theory of oscillations, the theory of automatic control, the theory of information, the theory of algorithms, the theory of tests, mathematical logics, the theory of games, the theory of statistical processes, etc...

The accumulation of objective scientific knowledge is accompanied by the development of all sciences and by the appearance of new fields of study. Thus, the foundation of atomic physics took place in the 20th century although the elaboration of separate aspects of this field had begun at a much earlier date.

Most characteristic of such sciences as chemistry, biology, astronomy, atomic physics, etc... is the presence of a combination of elements that are specific for each of the sciences and the interaction of which gives rise to definite structures. Sciences study these elements and their interaction, elaborate the methods of analysis and the way of building from these elements more complicated formations or systems, i. e. the elements, their formation and interaction are the subject of research. Let us take the following examples: atomic physics studies the electrons, protons, mesons, etc... and also their interaction within an atom. Chemistry studies the structures and their relations ranging from atom to molecule. Crystallography studies the interactions and the formations of molecules comprising crystalline structures.

All this may be related not only to sciences in which the combinations of elements are created by nature, but also to those fields of knowledge where the elements are man-made — the humanities, the technical sciences.

The control systems in engineering and the control systems in living organisms consist of characteristic elements which are combined in a definite sequence and have definite patterns: sensors (detecting elements), amplifiers, transducers, different logical elements, lines of communication, correcting elements, organs of control, etc. In living organisms, these are the receptors, different types of neurons, nervous fibres, effectors, which form control systems with a definite structure. Moreover, the complex system of control may be for convenience sake divided into the simplest systems and their elements.

The elements which are obligatory for any control system and which restrict the complexity of systems from below, are the so-called control elements; by applying small amounts of energy to these elements it is possible to control a big flow of energy. The most primitive of these are electrical switches, which for example, when an insignificant effort is applied to them may switch in a comparatively powerful engine. Among these elements are different types of amplifiers (electronic, magnetic, transistor, etc...) electrical potentiometers, cranes, etc...

The value of the energy at the output of a steering element depends upon the control action (the signal), applied at its input. There are a great number of electrical, mechanical, pneumatic and other elements in engineering, based on different principles of operation, having different characteristics and speed of action on-off action with linear characteristics, etc. A very high amplification efficiency may be obtained in these elements which control powerful streams of energy by a negligible power of the control action (the signal). This makes it possible to transmit information by signals with negligibly small energies and eliminate the direct relation between the information and the power (level) of the signals which transmits it. Thus a powerful electric station may be switched on from a certain distance by means of a signal the power of which is 10^{20} below that of the electric station.

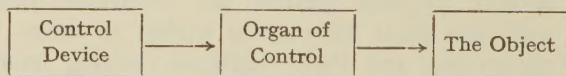


FIG. 1.

Let us consider the most primitive systems of automatic machine control. Fig. 1 shows a block-diagram of a most simple system without feedback (return communication), with a given programme.

The programme of the system's work is recorded in the memory elements of the control mechanism. The control mechanism communicates the control signals (commands) in keeping with the information preserved in its memory elements. These signals act upon the organ of control which performs the corresponding changes in the object. This system of control may be found in milling, turning and other automatic machine tools with a programme recorded either on punched cards or on magnetic tape. The system frequently has a feedback within the limits of one or several elements, but without the return communication between the object and the control mechanism.

The simplified diagram in fig. 1, also shows different cyclic automats such as the turret, printing machines, etc...

In the organisms, all control systems have a more complicated structure. However, it seems that some of the control functions are carried out after the diagram in fig. 1 (For instance, the appearance of unconditioned reflexes). Thus, certain species of fish during the spawning season perform in a definite sequence, a complex programme of actions which is passed from generation to generation and is associated with their migrations from the seas to the rivers, with the upstream movement, at times, of thousands of kilometres, digging holes on the bottom of the river, etc..... Moreover, the fry are preserved only in case the assigned programme of action is fulfilled, and therefore the given species is preserved. In this case, the return communication is performed through the generations, and ensures the natural selection and adaptation to environment. However, for the unconditioned reflex there is no manifestation of inverse communication for a given generation. In the same way there is no feedback between the object and the control system in a definite design of the above-mentioned automatic machine tools. However, the designer may introduce the necessary alterations into a subsequent group of machine tools manufactured at some plant proceeding from the operational experience of the previously built automatic machine tools.

Fig. 2 shows a block-diagram of another control system with a feedback through the object. In this case, an auxiliary measuring (sensory) element is introduced in the system and it reacts to the value of some parameter of the object (the detection of tension, current, mechanical shift, pressure, etc...).

In the simplest case the control system has (an on-off) relay action feedback. If the measured parameter exceeds a definite value, the feedback goes into operation and the control action

(signal) is communicated to the control organ which performs in the object an operation of relay action (for instance of the on-off type). Quite often the operation of the system is of a single action type.

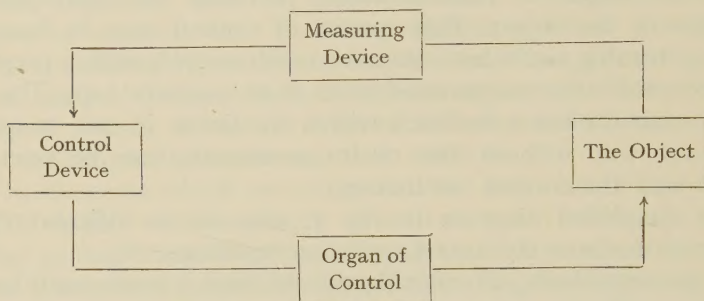


FIG. 2.

Belonging to the on-off feedback systems are different safety mechanisms such as the maximum steam pressure valves, maximum electrical or pneumatic switches, the safety systems in power grids, and also the appliances for repeated switch-on for electrical engines, different mines, etc...

In systems with a feedback of the on-off type, the control mechanism may additionally assign a definite programme of operation for the object, the information about which is stored in special memory elements. When the relay in the control mechanism goes into action the signals of this programme are communicated to the input of the control organs, i. e. the transfer of information and the corresponding action upon the object, in keeping with the assigned programme. In keeping with this pattern the automatic tape recorders, certain types of machine tools, emergency safety devices, etc..., are controlled.

In living organisms there are analogues of these systems such as the systems of protection against sudden bright light by involuntary lowering of the eyelids, the jerking of the hand as the response to pricking or burn, etc...

In keeping with the diagram in fig. 2, different types of automatic controllers with a continuously operating feedback are designed. In the simplest controller the control mechanism consists of a comparison element with the chosen value. The difference between the measured and the chosen values is supplied to the control element.

In order to improve the characteristics in the controller, elements of differentiation, integration, non linear elements, etc..., are included into it.

The automatic controllers are broadly employed to control the temperature of liquids, tensions, rotation, speeds, etc...

The theory of automatic regulation which developed from the theory of oscillations has reached a high level and is one of the basic theories in automatics.

The regulators in the organisms which act without the participation of conscience, have comparatively complex structures. Among them are the regulators which carry out the functions of maintaining the temperature, the sugar content and other component parts of blood, the equilibrium regulators, etc...

Even more complex control systems may be built after the diagram on fig. 2, for instance, those with a control system represented by a digital computer which, acting on the information obtained from the measuring elements and in keeping with its programme, works out commands (control signals).

Cybernetics concerns itself with the creation of machines that can adapt themselves to the environment in a similar manner to the organisms which possess this remarkable ability.

The properties of the objects of control may change in time by the influence of the climate and other aspects which are mainly of a random nature (the aeroplane flight under altered meteorological and other conditions, the work of an engine when the load and the properties of the fuel have been changed, the work under the complex conditions of a rolling mill, the blast furnace processes, etc...). While the control system maintained an optimal state at the outset, its operation may become worse as the environmental conditions change.

Among the most primitive control systems which depend upon the properties of the object, are the extremal automatic controllers which measure the parameters of an object and which carry out a scanning operation (the periodical scrub or scouring about) in the vicinity of the extremum of the operational characteristic for the maintenance of the optimum behaviour. This principle of operation is used for certain extremal controllers that perform the automatic tuning of radio sets. A number of extremal controllers (self tuning systems) have been designed and are employed for various purposes in engineering.

From the mathematical point of view, the extremal regulators perform the organised method on consistent approximations.

The "learning" control systems may be classed with more complicated systems. Thus far only the simple types of "learning" such as the development of "a conditioned reflex" and the simplest habits have been implemented in machines. The learning systems incorporate both the devices for resolving logical operations, and the memory devices. Moreover, the capacity of learning may be regarded as a chance process where the control system alters the probability of some action (reaction) provided the environmental conditions change in time. As an example of the simplest systems of learning we may mention Voltaire's turtle which imitates the development of a "conditioned reflex" and the Shannon's labyrinth in which a "mouse" after solving a task by the method of subsequent attempts, repeats the simplest solution without a single fault. The first steps towards the development of learning control systems open up fine prospects for the elaboration of automatic machine that could solve more complicated problems. All these tasks may be also settled by means of a digital computer when a definite programme of operation (the algorithm) is assigned to it.

As the control systems become more complicated the statistical approach and the statistical methods of research which are among the main ones in cybernetics acquire greater importance.

There is no doubt that the development of the science of control would assist the analysis and synthesis of substantially more complicated and perfect machines.

There is no doubt that the development of the science of control would assist the analysis and synthesis of substantially more complicated and perfect machines.

At present, we may trace back the science of control systems and analyse the comparatively simple control systems of machines but the upper boundaries of this science and the opportunities of more complicated control systems are hardly within our view.

As we have already mentioned, the lower boundaries of the most simple control systems, are determined by the presence of at least one control element, organ of control and the object. This is why not all systems founded, for instance, on the properties of the reflection of matter may be classed with control systems (The systems of inter-related celestial bodies such as the solar system, etc...). The upper borders of the control system can hardly be defined just as it is impossible to predict the biggest molecule that would be ever created. A large number of control systems may be formed even from the existing elements. Of these, only a negli-

gible number of types have been implemented in engineering, biology and the social sciences. The most complicated systems of control are met in society and at times they cannot even be described mathematically.

The study of the existing and of many other control systems is of great interest for the development of science and is without fail of a substantial practical importance.

The elements of control systems in engineering and in living organisms have greatly different characteristics and properties. In some cases even the structures of the systems differ. This is why regardless of the many common regularities, the mechanical approach is not permissible just as the identification of control systems in engineering and in living organisms. The fields of science which study control systems in engineering, and the control systems in living organisms are among the basic departments of science on cybernetic systems. In approximately the same way chemistry covers the organic and inorganic chemistry which greatly differ.

The speed of travelling of signals along a nervous fibre in man varies from several tens of metres to hundreds of meters per second, while the speed of the electrical current along the wires is close to 300,000 km. per second. i. e. is approximately one million fold greater. If the speed of action of a neuron is of the order of $1/100$ th of a second then the speed of action in the digital computers of similar elements is $1/10$ th and $1/100$ th of a micro-second, i. e. approximately one million fold greater. This allows us to handle in the digital computers a much greater volume of information per second than in the brain of man.

As N. Wiener notes, the number of regulators and other control systems in man is sufficient for equipping a big plant. The regulators of blood temperature, pressure, etc... maintain the value of the regulated parameter, with an accuracy which does not exceed decimal fractions of a percent in a healthy organism of man. Meanwhile, automatic controllers with a much greater degree of accuracy have been built and are used in technology. Thus, the controllers of automatic tuning in radio sets, have the accuracy which is several orders greater.

Also interesting is the information-psychological research in man that is conducted on a large scale in the United States, Germany and in other countries. According to findings at the University of Harvard and at the laboratories of the Radio Corporation of America, a man is capable of perceiving a maximum flow of

information through the organs of hearing, vision and through the sense of touch etc..., not exceeding 30-50 binary units per second. This limit is restricted not by ability of the organs, which are capable of transmitting a much greater volume of information per second (vision for instance), but by the handling ability of the brain which has a limit in analysing a certain volume of information per a unit of time. It should be noted that digital computers can analyse hundreds and thousands fold more information per second. With the development of technology, the volume of information handled by digital computers per second, grows rapidly.

While the maximum number of elements in engineering systems of control is equivalent to scores of hundreds of thousands, the brain of a human being has from ten to fifteen thousand million neurons with a relatively complex organisation of each neuron. Therefore, the integrated system of control in man is incomparably more complex and more universal than any system of control in technology. However, the engineering systems can settle a strictly limited and formally described problems at a much greater rate and with a higher degree of accuracy. With the development of technology and the science of the control systems the number of problems with increasing complexity is steadily growing.

Many problems of control in engineering, may be settled by means of separate simple systems or integrated systems consisting of automatic controllers, safety systems, extremal regulators, programmed systems, learning machines, etc... These tasks of control and even more difficult ones may be settled by means of one digital computer with the appropriate sensory elements and organs of control. The expediency of choosing the first or the second line depends on concrete conditions. Here an analogy might be drawn between the functions of the spinal chord and the brain in man.

A characteristic and main peculiarity of all control systems is the principle of coding, storage, analysis and communication of information both from one element of the system to another and between the object of control and the system in very differing processes (chemical, biological, electrical, etc...). As a result, the system introduces a definite pattern of organisation, a regularity in the movement or the process in the object of control. The latest control systems are capable of rendering a greater degree of organisation which is evaluated by the general amount of information it can handle.

The increment in the amount of information at the output of the

control system is equivalent to the difference of the entropies before and after the control system is switched in.

One of the main problems in the science of control systems should be the problem of the control efficiency which consists in the selections of the most efficient structure of the parameters of elements and the conditions of operation. One and the same task of control may be settled differently and by different technical means. The same thing takes place in the sphere of human activity. For instance when a man is learning to drive a car, at the first all the functions of control are carried out by the brain. Later on, a substantial part of the simplest control functions, are passed over to the spinal cord (the developed conditioned reflexes). Since the tasks of control may have several or many solutions, the question arises about the extremal solution for the definite parameters (the utmost productivity, the efficiency, etc...).

The problem of control efficiency for automatic controllers is mainly reduced to that of regulation, while, for the more complicated systems, it is associated with the possibilities of adaptation to the changes in the object or the environment.

Another very important control problem is that of reliability which consists in ensuring a definite degree of reliable operation of the system under different disturbances or disorders in the system (the influence of faults, the handicaps of the design, etc...).

The elaboration of these problems provides the possibility of analysis and a scientific synthesis of systems which settle different tasks of control. In this case the scientific subjects which study the processes that are concurrently present in physics, chemistry, biology, etc..., and related in a great degree to the processes of control, are the theory of oscillations, the theory of information, the theory of automatic control, the theory of algorithms, mathematical logic, the theory of games, the theory of tests, the theory of statistical processes. These comprise the scientific foundation of the control systems science, while their development determines in a great measure the advancement of the science on the systems of control.

Of late, our scientific and engineering literature has begun using the term "thinking machines" borrowed by technology from the sphere of human activity, just as it has been done previously with such terms as the fatigue of metals, the memory in machines, the sensory elements, the executive organs, etc...

It is quite natural that the fatigue of metals and the fatigue of

man is not one and the same thing. There is a substantial difference of principle between these concepts just as between the concepts mechanical memory and the memory in an animal or man.

The mechanical identification in this case may lead to very erroneous views. In the first case the concepts concern inorganic matter and the appliances which have more simple regulation, while in the second case they are related to living matter with an incomparably more complex organisation and regulation. Nevertheless, in both cases the main processes have a great deal in common. This is why the terms fatigue of metals and memory in machines have become widespread despite the opposition of some specialists and scientists.

All this also concerns the concept of "thinking machines" with the only difference that this term has not been generally recognised and is somewhat unusual. This is why it is hardly expedient to rise against the usage of the term "thinking machines" — the more so since, if we abandon it, a new term would have to be found as a substitute.

Of course, we should not mechanically identify the processes which take place in a "thinking machine" with those in the brain of man. It would be a mistake to believe that a machine can think just as man and that it has the same capabilities as man. The activity of man has always been and always will be more varied, more universal and more constructive.

An all-embracing and universal robot is a utopia. I believe that it will be impossible to implement a machine that would possess the same diversity of capabilities that is possessed by man both in physical and mental activity. Moreover, there is no such necessity, the less so since man creates machines and will be always building them in such a way that they will be more rational and will be of help to him. Thus, to perform mechanical (physical) work, comparatively narrow, specialised milling and turning machines, earth digging machines and others are built.

At the same time, there are no grounds to assert that the machines or a system of machines in their future development would be unable to carry out some definite functions of control, and even of very complicated or constructive nature. Such assertions can hardly be progressive.

Moreover, our knowledge on the systems of control in man is steadily growing and we can say that man is capable of recognising the structure and the laws of control action of the brain. A contrary statement would bring us to idealism.

Hence, we shall know the structure, the processes occurring in the control systems of man, and we shall be able to describe them with a growing degree of reliability. At the same time our knowledge in analogizing most different processes is steadily growing and even at the present state of science and technology, it is possible to create very complicated artificial systems of control. To bring this about it is necessary above all to study and describe the structures and the processes occurring in the systems which are being analogized.

Unfortunately, there is very little of what we know thus far about the control systems in living organisms and man.

Moreover, the evolutionary development of man and the improvement of the control systems in an individual, owing to a number of biological limitations is much slower than the rate of development of the control machines and systems. Besides, man can create more modern elements and complete systems of control to carry out definite functions of control similar to the created machine tools and complete production aggregates which perform certain operations with greater perfection and greater speed than can be directly done with the use of hands of man.

Here we can draw an analogy between the first industrial revolution which has liberated man from performing the most arduous and most tiring manual labour and the modern industrial revolution associated with the automation of production which relieves man from arduous and frequently harmful and tiring work of immediate and direct control of machines and production processes.

In this case, more qualified work is preserved for man, mainly in the field control of machine operation and with the introduction of automation in socialist society, the contradiction between mental and manual work decreases in a still greater degree while the activity of man becomes more varied, constructive and interesting.

Indeed, it is a constructive exploit of man when we look upon the modern control systems created by him and their rapid advancement. The creator of these machines and control systems — Man — will always be building them in such a way that they will be his reliable assistants, rendering his work easier.

It is hardly expedient even if there is a possibility of assigning to one and the same machine, the implementation of the man and the most complex functions which can be performed by man. This first of all concerns the field of arts, psychology (associated with the manifestation of interest), moral aspects, emotion, etc.

The science of control systems is in its first stage of development

and its future can be hardly over-estimated. All this requires a substantial expansion of research in the field of control systems, both in living organisms, machines and society.

A question arises "what should we call the science which studies the systems of control and their elements?" — a question which mainly depends upon the development of terminology. The term of cybernetics applied to this field of knowledge has a sufficient number of grounds both of historical nature and in relation to the fact that it was revived and coined by the founder of the modern science of control, Norbert Wiener.

La physique moderne et le problème des engrammes

par P. NAYRAC,

Professeur à la Faculté de Médecine de Lille

We have found no reason to doubt that a completely mechanistic device could be constructed which duplicates numerous functions of the brain ; the question is not this, but to determine what *the brain actually does*.

W. M. ELSASSER

Le comportement d'un organisme à un instant donné, dépend d'une information reçue souvent longtemps auparavant. Il faut que cette information ait été conservée, d'une manière ou d'une autre. Il faut qu'elle ait laissé des traces, ou, pour parler comme autrefois, des *engrammes*.

Il est logique de penser que l'information des expériences vécues est conservée par une modification matérielle de la substance cérébrale.

D'importants résultats ont été acquis par l'assimilation du cerveau à une machine où les engrammes viendraient s'enregistrer. Des lésions limitées entraînent la perte de certains comportements nécessitant de l'information (généralement acquise par des exercices itératifs) : gnosies, praxies, possibilité de réagir au symbolisme verbal ou de s'exprimer par lui. Il est d'autre part des comportements (le récit, par exemple) qui font intervenir une information liée à une expérience unique, circonstanciée, datée ; ces comportements aussi, on peut les voir abolis du fait de perturbations passagères (comme la sismothérapie) ou définitives (comme le syndrome de Korsakoff), plus ou moins localisées. De même, Penfield, par l'excitation péropératoire de très petites aires corticales a provoqué des récits spontanés faisant état d'une information anciennement reçue.

Seulement, connaître des aires dont la destruction (ou l'excitation) abolit (ou déclenche) certains comportements, ce n'est pas du tout connaître où et comment est conservée l'information qui se manifeste dans les comportements.

Tant que l'on a conçu cette conservation sous la forme grossière d'une sorte de fichier, aucun progrès n'a pu être accompli dans cette recherche. Et le terme même d'engramme est devenu suspect, du fait de ces échecs. Mais on ne peut, sans sortir du domaine de la physique, concevoir l'information comme « tombant du ciel » au moment de son utilisation.

Le mouvement mathématique moderne a fourni un langage propre à la description des systèmes de haute complexité à l'échelle moléculaire, dont la matière vivante est un cas particulier.

La biologie n'a guère tiré bénéfice des théories physiques tant que celles-ci ont gardé le type déterministe et se sont exprimées par des systèmes d'équations différentielles destinés à rendre possible la prédiction exacte à échéance quelconque comme cela se fait si bien en mécanique céleste. En biologie, en effet, la prédiction est aléatoire. Mais il y a maintenant de grands chapitres, en physique, où l'indétermination est admise et où la prédiction n'est pas requise. La mécanique des fluides, par exemple, et, naturellement l'atomistique.

Ces méthodes de formulation symbolique (qui sont la base d'une *biologie théorique* déjà bien développée) ne présentent-elles pas sous un jour nouveau le problème des engrammes ?

Il ne s'agit pas ici de philosophie. Il s'agit de voir jusqu'où mène la physique telle qu'elle est aujourd'hui. Il est probable que la vie psychique dépasse largement la biologie de la matière, mais c'est là une proposition qui sort de notre propos. Avant tout, la science, qui ne s'occupe que du mesurable, doit, pour connaître ses limites, s'occuper de tout le mesurable.

Les automates possédant des fonctions qui rappellent celles du cerveau, le cerveau est, en première approximation, une machine.

Une machine de jadis était un dispositif aveugle, mais parfait en ce que (à des détails techniques près), connaissant sa structure et ce qu'on y introduisait (matière et énergie), on pouvait prévoir rigoureusement ce qui allait en sortir. Les automates d'aujourd'hui, au contraire, possèdent souvent une entrée reliée à un générateur, de fonctions aléatoires pour faciliter les approximations successives. Et même, ils sont dotés de feed-backs, qui assurent l'auto-correction.

Ainsi sont rendus possibles les modèles électroniques pseudo-nerveux. Les tortues de G. Walter et l'homéostat d'Ashby sont des automates à feed-back, qui ont un comportement statistique grâce à des générateurs de fonctions aléatoires pour l'homéostat, et aux interactions fortuites avec le milieu pour les tortues. Ces dernières ne sont donc pas en elles-mêmes des automates aléatoires ; elles sont soumises aux équations différentielles déterministes de la physique classique et pourtant, bien que leur montage soit simple, il n'est pas possible de leur donner une formulation déterministe ; seules des prévisions statistiques sont possibles. On voit ainsi que, dans un dispositif comportant des feed-backs, même un faible degré de complexité entraîne l'apparition de propriétés qui eussent été imprévisibles par l'étude des composantes.

Tout ce que nous savons du cerveau normal ou pathologique, nous montre qu'il joue un rôle de premier plan dans la conservation de l'information. Nous raisonnerons donc sur le cerveau pour la commodité du langage, mais les principes appliqués, étant très généraux, seront valables pour toute matière extra-cérébrale qui pourrait intervenir.

Considérons le cerveau comme on considérerait un automate. L'axone est d'abord un appareil de transmission des trains d'impulsions. Il restitue l'énergie nécessaire à la propagation de ces signaux, tel un fil le long duquel seraient disposés des relais amplificateurs. La synapse au contraire, permet la modification, l'intégration, la modulation des trains d'impulsions. En langage machinistique, une synapse est d'abord un redresseur puisqu'elle s'oppose à toute transmission autre que celle qui va aux terminaisons axonales du péricaryon. Mais elle fonctionne aussi comme un robinet : par exemple, si elle est traversée par des impulsions allant du neurone A au neurone B, il se trouve souvent que des terminaisons venant d'un neurone C se rendent à la synapse dont elles modifient la perméabilité de manière à faciliter ou à inhiber le passage des signaux de A vers B.

Quant au péricaryon, il se peut qu'il ne soit pas seulement un appareil de transmission. Il possède un métabolisme actif dont les réactions enzymatiques sont, comme tous les phénomènes de catalyse, mathématiquement homomorphes au fonctionnement du robinet. Qu'il s'agisse en effet d'un robinet, d'un contrôle synaptique, d'une réaction enzymatique, tous ces cas ont en commun qu'une énergie w appliquée au dispositif contrôle une énergie W dont les variations peuvent être beaucoup plus grandes que w . Un appareil de contrôle est généralement aussi un amplificateur.

Classique est la notion de l'abondance des feed-backs, inscrite dans la morphologie et dans les fonctions du névraxe. Cela existe à l'échelle du corps entier : on modifie un mouvement commencé en fonction du mouvement déjà accompli. Mais il y a aussi des circuits neuronaux récurrents et même on peut décrire des feed-backs jusque dans le métabolisme intra-cellulaire. Par exemple, tout ion Na^+ qui se trouve avoir pénétré dans l'axone en est rejeté par une « pompe à Sodium » logée dans la membrane et par laquelle la concentration Na^+ est maintenue à l'intérieur de l'axone au 10^{me} environ de ce qu'elle est dans le tissu environnant.

Tout cela a une ressemblance évidente avec les automates électroniques. Il ne faut donc pas s'étonner que l'étude des fonctions cérébrales ait pu être fructueuse dans une perspective machinistique, même avant d'avoir à sa disposition les théories modernes par quoi se fait l'évolution de la neurophysiologie. Mc Culloch et Pitts ont insisté sur l'homologie qui existe entre l'activité nerveuse et la logique formelle utilisée par les calculatrices.

C'est aux machines *analogiques* que le cerveau ressemble, plus qu'aux machines *digitales*, dont l'ancêtre est la calculatrice de Pascal, et qui donnent un résultat exact en ce sens qu'on peut les construire de telle sorte que l'erreur soit rendue aussi petite que l'on veut, mais au prix d'une relative lenteur. Les machines *analogiques* assimilent les opérations à effectuer à des relations connues entre certaines grandeurs physiques. Par exemple, pour multiplier 3 par 4, on enverra un courant de 3 ampères dans une résistance de 4 ohms, et on constatera que la différence de potentiel aux bornes de cette résistance est de 12 volts. Le mérite de ces calculatrices est leur rapidité ; leur défaut est que leur précision est limitée par celle des appareils de mesure, et que, si le résultat est réintroduit, les erreurs sont cumulatives.

L'électrophysiologie a montré que le *cerveau utilise des signaux digitaux à modulation de fréquence* (cette modulation constitue une protection contre les perturbations aléatoires, fait bien connu en matière de télécommunications ; ainsi un signal faible n'est pas plus perturbé qu'un signal fort), *mais c'est surtout une machine analogique*. Il n'a qu'une précision limitée ; il fournit surtout des résultats qualitatifs, mais il les fournit assez vite : ainsi, l'information conservée s'exprime immédiatement par un comportement caractéristique, tandis que, par exemple, l'information génétique contenue dans l'oeuf ne se révèle qu'à échéance.

Un caractère analogique se montre dans ce fait que l'homme ne peut calculer comme une machine digitale. Cette dernière fonc-

tionne directement, sans posséder aucune instruction préalable, tandis que l'homme apprend d'abord la table d'addition et de multiplication, qu'il combine ensuite avec les opérations logiques.

Un neurone reçoit des ramifications venant de plusieurs neurones, et envoie ses ramifications à plusieurs neurones. Même dans les aires visuelles (où pourtant la projection est très précise), une excitation diffuse dans une aire de surface petite, mais non nulle. Ces faits anatomiques ne s'expliquent pas avec un fonctionnement digital et supposent un fonctionnement analogique.

Certains auteurs ont même vu dans les modes de fonctionnement synaptiques la transposition de certaines opérations de l'algèbre de Boole. Le blocage serait l'analogue de la négation. La sommation serait l'analogue de l'opération ET.

Une différence existe toutefois entre cerveau et automate, c'est que le cerveau possède un fonctionnement électrochimique.

Différence entre le cerveau et les automates électroniques : un signal qui circule dans le cerveau est un phénomène électrique, mais ce n'est pas qu'un phénomène électrique : c'est un phénomène électrochimique. Dans l'axone, les phénomènes chimiques ne jouent peut-être qu'un rôle énergétique, restituant de l'énergie aux impulsions, mais il est sûr que dans les synapses, les réactions chimiques interviennent bien en tant que vectrices d'information. De plus, dans les organismes vivants, il y a de l'information à transmission humorale, par exemple l'adrénalinogénèse de l'émotion. Et les choses se compliquent du fait qu'une hormone peut être impliquée à titre de corps chimique dans la réaction qu'elle a, elle-même, commandée.

Dans les automates au contraire, le matériel est toujours choisi avec un maximum de stabilité chimique, et l'information n'y existe que grâce à des supports physiques.

Autre différence : pour assurer les mêmes services, un automate doit être plus volumineux qu'un cerveau.

Les automates sont surtout des calculatrices, qui effectuent des opérations de logique mathématique, tandis que les cerveaux font bien d'autres choses, mais cela n'empêche pas la comparaison, car on peut matérialiser en signaux, non seulement les nombres et les opérations logiques, mais encore toute proposition définie. Un automate peut explorer son entourage et le décrire, et même en français, s'il est doté d'un lexique exploitable par balayage, extraction et lecture.

En fait, la différence entre un automate et un cerveau, c'est le volume. Un automate qui reproduirait les fonctions d'un cerveau, devrait être grand comme un des plus grands buildings (à moins de fonctionner, grâce à la technique des cryotrons, au voisinage du zéro absolu, comme le prévoit King ; mais puisqu'il s'agit de comprendre le cerveau, on doit considérer des automates fonctionnant à proximité de 37°C). Si l'on imagine un cerveau comme un automate simplement réduit dans ses dimensions, ses feed-backs sont à une échelle où les lois des automates cessent de s'appliquer. Cela ne signifie toutefois pas que le cerveau échappe à la physique en général, et à la mécanique quantique, en particulier : la théorie des matrices statistiques, en effet, développée par Dirac puis par von Neumann, donne l'expression la plus générale d'un système soumis à la mécanique quantique, et comprend les phénomènes biologiques comme cas particulier.

Dans quelle mesure peut-on assimiler le cerveau à l'automate en ce qui concerne le problème particulier de la nature des engrammes ?

Ces comparaisons générales entre cerveau et automate expliquent que la conservation de l'information dans le cerveau puisse être assimilée pour une large part à ce qui se passe dans les machines. Mais peut-on espérer pousser jusqu'au bout cette assimilation ?

L'information ne peut être conservée dans le cerveau que sous la forme circulante ou sous la forme statique. L'information circulante se présente dans le cerveau et dans l'automate sous des formes comparables. Mais l'information circulante suppose une réalimentation par une masse d'information conservée sous la forme statique.

Déjà, la conservation contenue dans les activités itératives (langage, praxies, gnosies) est difficile à imaginer dans ses détails. Tous les auteurs parlent de « facilitation synaptique » : des circuits souvent utilisés finiraient par acquérir une perméabilité préférentielle. Mais on ne sait quelles modifications matérielles sont le substrat de cette facilitation. Et d'autre part, cette explication ne saurait être généralisée, car il y a dans le cerveau de l'information qui fut acquise à la suite d'un petit nombre d'expériences vécues et même, très souvent, d'une expérience unique. On peut alors imaginer (mais sans aucune base tirée de l'observation) des modifications de structure inscrites dans les molécules protéiniques. Les dix milliards de neurones du cerveau offrent des possibilités suffisantes pour la conservation de l'information recueillie au cours d'une

vie, mais on conçoit difficilement comment cette information, fragile puisqu'inscrite à l'échelle moléculaire, se conserverait au milieu d'un métabolisme générateur de perturbations aléatoires. La question est de savoir si, ce que l'automate fait dans un grand volume, le cerveau peut le faire dans un petit. Ou, reprenant la question telle que la formule von Neumann : peut-on réduire un grand automate au volume d'un cerveau ? Des faits neurophysiologiques actuellement connus, une réponse négative semble se dégager.

Certes, il est des analogies sur lesquelles il est juste d'insister. Le cerveau possède certainement des réseaux de boucles neuronales où l'information circule par réverbération sous la forme de trains d'impulsions. En admettant que ces réverbérations puissent se maintenir longtemps sans subir trop d'altérations, elles constituent vraiment un modèle acceptable de fonctionnement machinistique très analogue à la conservation dynamique qui, dans les automates, garde en circulation une information immédiatement utilisable. Mais on ne saurait trouver ici la stabilité nécessaire pour une conservation à long terme.

Les aspects EEG, images des réverbérations, subissent des modifications radicales selon que le cerveau est en état d'activité, de repos, de sommeil. Et surtout, toute information qui circule dans un circuit de petites dimensions, au voisinage immédiat d'autres circuits, est forcément perturbée par le bruit (c'est déjà vrai pour les grands automates, où des dispositifs de régénération ont dû être prévus, qui utilisent la redondance pour annuler les effets du bruit).

A cause du bruit (terme général embrassant l'ensemble des agents aléatoires de perturbation), toute information circulant dans un système isolé se dégrade. La comparaison avec la dégradation, dans un système isolé, de l'énergie, conformément à la seconde loi de la thermodynamique, est mieux que métaphorique, mieux même qu'homomorphique, elle est le fait d'une parenté profonde, fondamentale, physique, entre les deux ordres de phénomènes, car la seconde loi de la thermodynamique apparaît aujourd'hui comme déductible d'un principe plus général dégagé par la théorie de l'information.

Conséquence : de même que nulle machine ne peut fournir de l'eau froide et de l'eau chaude à partir d'une masse d'eau tiède, sans apport extérieur d'énergie, de même nulle machine (et nul cerveau) ne peut convertir du bruit (c'est-à-dire du hasard) en une information ayant un sens. Le bruit ne peut que rendre un message inintelligible, il ne peut pas le transformer en un autre message intel-

ligible. Un récepteur de TSF, soumis à un orage, peut rendre méconnaissable le *Menuet* de Ravel; il ne fera pas entendre en son lieu et place une conférence sur la biologie des orchidées. Pour un grand automate ou pour un cerveau, il faut que l'information qui circule ait un sens puisque c'est elle qui précise ce qui doit être fait dans l'instant immédiatement à venir; si elle n'est pas significative, la machine est bloquée, le comportement est pathologique.

L'agitation thermique est la cause principale du bruit. Tous deux sont aléatoires, c'est-à-dire impossibles à étudier de façon déterministe, mais soumis à des lois statistiques. La formule de Tuller-Shannon montre que le bruit ne peut être complètement annulé, quel que soit le canal. Nulle machine ne peut être parfaitement précise.

Certes, la précision des signaux est exigée beaucoup plus grande dans un automate que dans un cerveau. Dans une calculatrice, la probabilité d'une erreur fortuite doit être inférieure à une chance sur plusieurs milliers de milliards de battements. En supposant un circuit cérébral fonctionnant avec seulement 5 chances sur 100 d'erreur (probabilité considérée comme négligeable en biologie), il suffit que la probabilité d'une erreur fortuite soit inférieure à une chance sur un million d'impulsions.

Malgré ces conditions particulièrement favorables, il n'en est pas moins vrai que, dans le cerveau, une augmentation cumulative des erreurs fortuites est à redouter, puisque les trains d'impulsions circulent longtemps dans un système complexe, l'information d'un cycle étant fonction de celle du cycle précédent. Et cette augmentation cumulative est inadmissible au-delà d'une certaine limite. Une conception machinistique doit supposer (comme dans les automates) des détecteurs d'erreurs. Et aussi des dispositifs autocorrecteurs.

Peut-on idéalement concevoir la construction d'une telle machine capable de maintenir stationnaire le pourcentage d'erreur de son information circulante? von Neumann a traité ce problème et a démontré qu'il faut que l'information y circule dans des « dispositifs majoritaires » parallèles, les connections d'un dispositif au suivant étant permutées au hasard. Les composantes parallèles doivent être au nombre de quelques milliers. Dispositif extrêmement coûteux, dont on ne voit aucun équivalent dans le cerveau où, comme on le sait depuis Cajal, règne la loi de l'économie de matière et d'espace.

Ces études de von Neumann montrent l'utilisation qui peut être faite de la *redondance*.

Toute information peut être codée d'une infinité de façons,

mais il y a toujours une façon de coder qui exige moins de signaux que n'importe quelle autre. Tout codage qui n'est pas le codage minimum présente une certaine redondance. Evidemment, la redondance est nuisible parce que peu économique dans la présentation de l'information. C'est ainsi que, dans les automates, pour l'information statique déposée dans des matériaux physiquement et chimiquement au repos, sous un volume assez grand pour que l'agitation thermique y soit négligeable, il y a intérêt à réduire la redondance au minimum pour emmagasiner le maximum d'information dans le minimum de matière. Mais la redondance n'est pas toujours nuisible. En particulier, elle est le moyen le plus efficace de protection de l'information circulante. von Neumann utilise en somme le type le plus simple de redondance, c'est-à-dire, la répétition par de nombreux canaux parallèles, avec un facteur de redondance de plusieurs milliers.

Il y a certainement dans le système nerveux des exemples de transmission par de nombreux canaux parallèles dont le nombre implique peut-être de la redondance : par exemple, dans les voies optiques, et aussi dans la voie motrice. Mais il ne semble toutefois pas que, dans le cerveau, soit appliquée sur une échelle significative la protection, par la redondance, de l'information circulante.

Partant, il est indispensable qu'il y ait une régénération de l'information circulante.

Cette régénération peut se faire dans un canal par le contrôle d'un autre canal, du fait d'un couplage physique. Le circuit régénérateur doit fournir de l'information, car s'il n'en fournissait pas, c'est du bruit qu'il introduirait, ne faisant ainsi qu'aggraver la dégradation. Mais puisque le circuit régénérateur introduit de l'information, nous n'avons fait que reculer le problème, puisque se pose la question de la régénération du circuit régénérateur.

En fin de compte, l'information régénératrice doit forcément être graduellement fournie par des appareils capables d'une *conservation statique de l'information*. Si bien que le problème de la conservation circulante se ramène à celui de la conservation statique.

La conservation de l'information est sans doute aidée par le dégagement préalable de schèmes. Cette opération peut être conçue comme utilisant des procédés machinistiques.

Dans une machine analogique comme semble être le cerveau, la conservation de l'information ne se fait pas sous la forme d'un simple enregistrement passif des stimuli. L'évidence psychologique,

confirmée par l'expérimentation, montre que l'information reçue se manifeste dans le comportement ultérieur sous une forme élaborée, comme un schème, comme un concept.

On peut en effet généraliser à n'importe quel degré de complexité le procédé qui consiste à définir entièrement une figure géométrique par quelques propriétés simples nommées *invariants*, et par une ou plusieurs mesures définissant sa grandeur (par exemple : un triangle rectangle isocèle dont l'hypothénuse mesure 3 cm). Puisque ce procédé peut être généralisé, on peut construire une machine à dégager, puis à reconnaître les structures. Un appareil balaie l'objet et en tire une séquence de signaux, puis un autre appareil en dégage les invariants par comparaison à un répertoire qui peut être, soit donné à la machine lors de sa construction, soit constitué par la machine elle-même lors de son fonctionnement, soit encore donné par construction et enrichi par fonctionnement.

On voit ainsi que l'essentiel dans le dégagement des invariants qui forment un schème, c'est l'élimination de la redondance, qui ramène le message exprimant une chose au minimum de bits nécessaires.

Nécessaires à quoi ? L'appréciation de la redondance est chose relative. Une transmission peut, ou bien permettre à un ignorant de reconnaître une chansonnette en vogue, ou bien, permettre à un amateur éclairé de goûter toutes les perfections d'un orchestre classique. Dans le second cas, il faudra cinq ou six fois plus de bits par seconde que dans le premier, mais ce ne sera de la redondance que pour un public sans culture. De même, il arrive que lors d'une expérience vécue, la schématisation qui préside à la conservation de l'information soit excessive : ultérieurement des détails abusivement éliminés peuvent faire défaut à la réalisation d'un comportement adaptatif.

Bref, on peut imaginer qu'il existe dans le cerveau, pour la genèse des schèmes et des gnosies, des organes de balayage, de dégagement, de comparaison, et aussi de très riches répertoires. Seulement, ni l'histologie, ni la physiologie n'ont jamais montré dans le cerveau, rien qui pût rappeler ce qui existe dans les automates, ni support inerte d'information, ni « têtes » pour la lecture et l'écriture.

On ne peut concevoir que deux modes de conservation statique : soit sur support inerte (soustrait au métabolisme), soit sur support métabolique (conservant l'information en dépit du renouvellement constant des atomes qui le constituent). L'hypothèse du support inerte, réalisée dans les automates, se heurte pour le cerveau à tout ce qu'on sait de neurobiologie.

Les automates conservent l'information statique grâce à des émulsions sensibles, des disques, des cartes perforées, des tambours magnétiques.

L'information statique, n'est utilisable qu'au prix d'un temps perdu. Mais elle se conserve indéfiniment sans frais et sans apport d'énergie. Et surtout, dans les automates, l'information statique est pratiquement soustraite à la dégradation par le bruit car il n'y a pas d'échanges entre le support et le milieu, pas de perturbations aléatoires, tout se passant très au-dessus de l'échelle moléculaire.

Mais dans le cerveau, il est certain qu'il n'y a pas, pour la conservation statique, de dispositifs à l'échelle supramoléculaire. Et les garanties de sécurité qui existent dans les automates cessent d'être valables quand l'emmagasinement statique de l'information est censé se faire sous un très petit volume, car alors les réactions chimiques entre le support et le milieu, cessent d'être négligeables, ainsi que l'agitation thermique génératrice de bruit. On ne peut obtenir un fonctionnement déterministe qu'à l'échelle macroscopique.

Il ne semble donc pas que la conservation statique de l'information puisse se faire dans le cerveau sur support inerte macroscopique, comme cela se fait dans les automates.

Ceci ne veut pas nier la dette de reconnaissance que la neurophysiologie a contractée envers la physique des automates. La théorie machinistique est une approche indispensable. L'histologie cérébrale n'est pas sans analogies avec le schéma d'un automate : dans les deux cas, on trouve des dispositifs élémentaires juxtaposés à un grand nombre d'exemplaires avec de nombreuses connections (par exemple, pour le cerveau, de multiples synapses identiquement connectées). Approximation indispensable, mais qui ne donne pas une image exhaustive de tous les faits. On peut admettre un grand automate, mais la manière dont il conserve l'information sur support stable n'est pas celle qu'emploie le cerveau tel qu'il nous est donné dans sa boîte crânienne.

Dans les automates, le support de l'information statique est inerte, mécaniquement et chimiquement parlant.

Pour un carton, pour un tambour, les déformations sont négligeables et ne sauraient introduire d'erreurs. Rien de pareil dans le cerveau : la matière cérébrale est presque fluide.

La stabilité chimique du support de l'information est obtenue en utilisant des corps dont les réactions avec le milieu ne se produisent qu'au prix d'un premier apport d'énergie non négligeable (pour amorcer la combustion d'un carton, il faut au moins une

allumette). De plus, ces corps entrent dans la constitution du support en masses importantes, comprenant un grand nombre de molécules ; ainsi, si une réaction faiblement énergétique a lieu (une légère oxydation superficielle par exemple), elle n'intéresse qu'un nombre de molécules négligeable par rapport à la masse (même si la réaction se poursuit longtemps) et n'introduit par conséquent aucune perturbation sensible.

On ne voit pas, dans le cerveau, quelles masses multimoléculaires paraissent disposées pour une telle conservation, et surtout, nulle part, on n'y a trouvé autre chose que des substances soumises à des réactions faciles et faiblement énergétiques avec le milieu. Tout support cérébral d'information est forcément constitué par des molécules protéiniques, c'est-à-dire par une substance métaboliquement très active dont il est douteux qu'à échéance elle puisse encore contenir des molécules inchangées ayant gardé leur place, leur structure, leurs liaisons, impliquées qu'elles sont en d'incessantes réactions progressives, lentes, réversibles, peu énergétiques. Et ce qui ajoute encore à l'invraisemblance de ce mode de conservation, c'est que beaucoup d'information devrait être conservé dans peu de volume, circonstance très favorable à la production du bruit par le désordre moléculaire à cause des couplages, feed-backs, et contrôles amplificateurs multiples aléatoirement perturbés qui caractérisent la matière vivante.

Le seul mode de conservation statique de l'information sur support inerte qu'on puisse imaginer dans le cerveau, serait que cette information s'inscrive — d'une manière ou d'une autre, peu importe — dans des macromolécules, les « fixant » du fait même de cette inscription, les transformant de manière irréversible en des poussières moléculaires désormais soustraites au métabolisme et restant indéfiniment comme des corps étrangers non irritants (de dimensions moléculaires, car s'il en était autrement, on les aurait vus) dans le tissu cérébral. Il n'est pas besoin d'insister sur le caractère purement imaginatif de cette hypothèse, qu'aucune constatation précise n'autorise. Et encore faudrait-il préciser quelles sont les « têtes » (à l'échelle moléculaire, elles aussi) qui pourront y procéder à la lecture.

Au total, il n'est pas impossible d'imaginer la conservation sur support inerte, et Cahn est trop absolu quand il dit qu'Elsasser rejette définitivement cette hypothèse. Mais il n'en reste pas moins qu'il est difficile de concevoir comment le cerveau pourrait la réaliser à la manière des automates.

Différence importante, mais seule différence. Si l'on arrivait à y

découvrir un support inerte de l'information, le cerveau serait un automate et rien de plus. Objectivement, du moins, car subjectivement, l'autorité de l'intuition immédiate impose à chaque homme l'existence des phénomènes de conscience ; mais cela n'est plus de la physique.

L'hypothèse de la conservation de l'information statique sur support métabolique a le mérite de la vraisemblance.

Une conception élargie consiste à admettre que le métabolisme, outre son rôle plastique et son rôle énergétique, peut être lui-même support d'une information, qui en fin de compte se dégagerait des configurations moléculaires pour déterminer le comportement. Que l'information puisse être conservée par un support soumis à un incessant renouvellement métabolique, cela n'est pas douteux : il suffit pour s'en convaincre de considérer, par exemple, la constance des empreintes digitales d'un sujet donné, alors que rien, dans les papilles dermiques, n'échappe au métabolisme. Il est parfaitement admissible que l'information conservée dans le métabolisme moléculaire puisse de proche en proche élever son action jusqu'à l'échelle macroscopique du comportement.

Dans les automates, il y a, d'une part, les organes de la machine, et, d'autre part, l'information qui y circule ou y séjourne comme quelque chose de surajouté. Dans le cerveau au contraire, structure et information paraissent liées. Il en résulte une importante différence de principe dans le fonctionnement : la faible énergie mise en jeu par les échanges chimiques dans le cerveau, ainsi que les très nombreux couplages, permettent la facile diffusion de l'information, d'où il résulte que la prévision déterministe (idéal à peu près réalisé des automates) paraît impossible dans le cerveau. On reviendra plus loin sur ce point.

Dans l'ensemble, le couplage de l'information conservée à l'échelle moléculaire avec des systèmes de plus en plus grands, pour aboutir aux comportements macroscopiques, n'est autre chose qu'un phénomène d'amplification. L'amplification joue un rôle important dans toute la biologie — Jordan y insiste — mais généralement il s'agit d'une amplification continue, et qui demande du temps : le cerveau est une exception à cet égard, car on sait avec quelle rapidité l'information, même non circulante, passe dans le comportement.

L'hypothèse du support métabolique n'a de sens opérationnel qu'en formulant cette assertion que l'information conservée peut être lue

dans le métabolisme sans attendre qu'elle se manifeste dans le comportement ultérieur, lequel peut être ainsi prédit.

Donc, il semble que l'hypothèse la plus probable, quant à la nature des engrammes, est qu'ils existent dans le métabolisme sans le secours d'un support inerte. Cette hypothèse, nous allons maintenant chercher si l'on peut en concevoir la vérification expérimentale, à la lumière des principes de la physique théorique.

Le problème se pose de façon opérationnelle (la seule qui ait un sens en physique) par la question suivante :

Peut-on connaître l'information conservée dans un cerveau sans attendre qu'elle s'extériorise dans le comportement de l'individu considéré (dans un récit, par exemple), et cela par des mesures pratiquées sur le cerveau ?

Cette expérience n'est évidemment pas actuellement réalisable par un observateur humain ordinaire. C'est une expérience *idéale*. Pour la réaliser, il faut faire appel à un personnage bien connu de la physique théorique, *l'observateur de Laplace*, qui est un observateur capable de mesurer, à un instant donné, un très grand nombre de grandeurs. Cet observateur est très habile, mais ce n'est pas un dieu, car il n'alimente sa connaissance que par des moyens humains, par des lectures effectuées sur des règles et des cadrans.

C'est lui qui va devoir dresser, à un instant donné, le tableau des positions, des vitesses, etc., pour un très grand nombre de particules cérébrales.

L'hypothèse des engrammes signifie alors que, ce tableau dressé, on peut y lire, exprimée dans un code déchiffrable, l'information précédemment accumulée et ultérieurement exprimable dans le comportement, et cela avant que cette information ait eu l'occasion de s'inscrire dans le comportement macroscopique de l'individu, comportement devenu ainsi prévisible ; la comparaison ultérieure du comportement prévu et du comportement observé permettra la vérification de l'hypothèse.

Il n'y pas d'objection à tirer du caractère qualitatif de l'information vécue contre la possibilité de son inscription dans des structures matérielles : on démontre, en effet, que toute information peut être présentée sous de multiples formes, dont une au moins est une suite finie de nombres : c'est le *principe de la transformabilité de l'information*.

En revanche, il n'est pas sûr que le recours à l'observateur de Laplace (qui seul donne un sens à l'hypothèse du support métabolique) soit légitime. Étant donné un système à haute complexité

(un système muni d'un cerveau par exemple), on peut, sans le modifier, exprimer numériquement de façon précise sa structure *macroscopique* et son comportement, puisqu'il ne s'agit que d'interactions *macroscopiques* avec le milieu (convenablement amplifiées au besoin). Mais plus les mesures se font proches de l'échelle moléculaire, plus elles comprennent d'éléments statistiques, d'où une limitation de la précision, inhérente à la nature intrinsèque des choses. Brillouin a montré que l'observateur de Laplace ne pourrait préciser la structure moléculaire d'un système à haute complexité qu'en accroissant sa propre entropie de façon tout-à-fait excessive : par exemple pour étudier la matière vivante terrestre, il devrait disposer d'un appareil de mesure occupant une importante fraction du volume total de l'univers.

Les travaux récents paraissent donc impliquer une limitation considérable des performances possibles de l'observateur de Laplace. Supposons néanmoins qu'il soit admissible d'y recourir.

Tout système à haute complexité, grand ou petit, vivant ou non, introduit dans la prévision une incertitude qui croît avec le temps.

De plus, les mesures à l'échelle moléculaire altèrent forcément le système auquel elles s'appliquent.

Il n'est de mesure que macroscopique. C'est ce qu'exprime Elsas-ser en disant que toute mesure individuelle à l'échelle moléculaire est une amplification. Et le métabolisme (qui, demandant peu d'énergie, mène à des réarrangements faciles) introduit un facteur d'indétermination. Or il n'est pas possible, en vue de cette mesure, de l'éliminer sans de graves perturbations, si l'on tient compte de la rapidité avec quoi changent les configurations.

Dans un système à haute complexité, la mesure des structures à un instant donné est ainsi difficilement concevable. Supposons cependant cette mesure possible et tentons, à partir d'elle, de prévoir le comportement ultérieur. On démontre que, le système étant à haute complexité, la prédiction se fait de moins en moins précise au fur et à mesure qu'on la projette de plus loin dans le futur. Born, Horton, ont montré que dans un système dynamique complexe soumis seulement à la dynamique classique (échappant par conséquent à la relation d'incertitude de Heisenberg) mais comportant de nombreuses coordonnées couplées les unes aux autres par interactions mutuelles, la moindre erreur sur une seule coordonnée à l'origine s'étend progressivement à tout le système, d'où une incertitude qui croît avec le temps. Cela ne dépend pas du volume du système, mais bien seulement de sa complexité.

Cela ne tient pas non plus à l'incertitude quantique, puisque la théorie vaut pour le cas idéal de la mécanique classique ; mais l'erreur dans le futur est encore accrue si la mécanique quantique ajoute à l'erreur initiale.

Dans une masse macroscopique peu hétérogène, la relation d'incertitude de Heisenberg devient statistiquement négligeable. Mais si cette masse est un système à haute complexité, cette haute complexité est un facteur d'incertitude bien plus important que la relation de Heisenberg. Brillouin a démontré que dans un système à haute complexité, l'incertitude peut être des centaines et des milliers de fois plus grande que ne le laisserait supposer les relations d'incertitude relatives aux particules élémentaires individuelles. L'indétermination se présente comme une caractéristique irréductible des systèmes à haute complexité.

On n'envisage ici que l'éclairage sous lequel la physique moderne fait apparaître le problème des engrammes : on considère donc que la conservation de l'information reste soumise aux lois de la physique.

Nous nous acheminons, semble-t-il, vers cette conception que la conservation dans le cerveau ne se fait pas par des modifications physiques telles qu'un observateur de Laplace, après les avoir mesurées, puisse en lire le contenu sans attendre que cette information se soit traduite dans le comportement. Ce serait un cas particulier de l'opinion, aujourd'hui largement admise, selon laquelle les lois de la biologie ne pourraient être déduites de celles de la physique. Cela ne veut pas dire que l'information conservée « tombe du ciel » à l'instant de son utilisation. Il est logique d'admettre que la conservation de l'information est en corrélation avec certains phénomènes matériels à l'échelle moléculaire ; mais il semble que ces phénomènes soient expérimentalement inobservables, et cela non du fait de l'insuffisance de nos techniques, mais bien du fait de la nature intrinsèque de la haute complexité des systèmes mis en jeu. Cela ne veut pas dire que la conservation de l'information dans le cerveau échappe aux lois de la physique (de la mécanique quantique en particulier, puisque von Neumann a d'ailleurs montré que la mécanique quantique doit annexer toute loi physique à titre de cas particulier). Si une contradiction apparaissait entre les lois de la physique et l'hypothèse que les engrammes s'inscrivent dans le métabolisme, alors il faudrait abandonner l'hypothèse. Mais il ne semble pas qu'une telle contradiction puisse paraître, car on va voir que probablement l'hypothèse n'est pas susceptible de vérification (ni d'ailleurs de réfutation) expérimentale.

Principe de complémentarité généralisée : on ne peut mesurer l'état d'un cerveau à un instant donné sans le perturber de telle sorte que l'on ne sait plus si le comportement ultérieur est bien celui qu'on aurait observé si l'on n'avait pas effectué de mesures.

Cette impuissance de l'expérience devant l'hypothèse de la conservation de l'information sur support soumis au métabolisme est d'abord le fait d'un principe dégagé par Bohr voici déjà une trentaine d'années, le *principe de complémentarité généralisée*.

Pour étudier un système à haute complexité, doté de très nombreux couplages réciproques, l'observateur de Laplace doit procéder, en peu de temps, à de très nombreuses mesures à l'échelle moléculaire. Or on sait depuis Heisenberg, qu'à cette échelle, l'énergie des photons explorateurs n'est pas négligeable. Dans un système à haute complexité, les très nombreuses mesures entraînent des perturbations individuellement minimales, mais cumulatives, ce qui aboutit à de profondes modifications de la dynamique du système, dont on ne peut plus, désormais, garantir que son comportement ne va pas être complètement différent de ce qu'il eût été s'il n'avait pas été observé. Ceci est valable pour tous les systèmes à haute complexité, vivants ou non, et donc en particulier pour le cerveau.

Si l'information est conservée par un support inerte soustrait au métabolisme, l'observateur de Laplace peut en prendre connaissance sans perturber sensiblement le comportement ultérieur, et par conséquent établir valablement des corrélations entre les structures observées et l'information qui se manifestera ensuite dans le comportement, faisant ainsi la preuve de la validité de l'hypothèse.

Mais si l'information est conservée par un support dont les molécules participent au flux métabolique, alors le seul fait de prendre connaissance de ces structures moléculaires suffit à interdire l'établissement de corrélations ultérieures avec le comportement : l'hypothèse ne peut être, ni démontrée, ni réfutée. Et cela non pas du fait de notre insuffisance instrumentale actuelle, mais bien du fait de la nature même des choses.

Principe des classes finies : on ne peut établir de corrélation entre l'état du cerveau à un instant donné et le comportement ultérieur, même en utilisant la méthode statistique, c'est-à-dire en observant l'état d'un lot de cerveaux, puis en établissant des corrélations avec les comportements d'un autre lot (Elsasser).

La conservation de l'information dans le métabolisme est tellement conforme à tout ce que nous savons de physiologie générale, qu'il vaut la peine de chercher un autre moyen pour donner un sens opérationnel à l'hypothèse la plus probable.

Puisque l'observateur de Laplace ne peut examiner un cerveau sans introduire des chances prohibitives de perturbations du comportement ultérieur, il peut renoncer à procéder individuellement : il peut procéder statistiquement, comme on fait souvent. Il prendra pour son étude toute une classe de cerveaux. Dans cette classe, il choisira un échantillon au hasard et déterminera les configurations moléculaires de tous les cerveaux de cet échantillon. Le comportement ultérieur de ces cerveaux sera probablement perturbé ; il n'en sera donc plus tenu compte. Ce qu'on observera ensuite, ce sera le comportement (non perturbé) du reste de la classe ; et ainsi des corrélations seront possibles entre les configurations moléculaires observées grâce au premier lot et les comportements observés grâce au second. D'où des lois qui permettront ultérieurement, sur une autre classe, de prévoir statistiquement les comportements après avoir déterminé les configurations moléculaires. Ainsi sera démontrée l'hypothèse de la conservation de l'information avec support participant au métabolisme.

Ce plan de travail doit être considéré dans son aspect quantitatif.

Il est difficile de chiffrer la capacité en information d'un cerveau humain, mais il est assez aisé de préciser des quantités d'information qui en donnent une idée. Par exemple, le cerveau d'un comédien contient, du seul fait de sa profession, suffisamment d'information pour occuper plusieurs heures d'émission radiophonique. Disons trois heures. Supposons l'émission, non pas de haute fidélité, mais de qualité médiocre, disons 10.000 bits par seconde. Tenons compte de ce que le français a une redondance de 50 % environ. Nous arrivons à un total de 54 millions de bits.

Une information de S bits suppose des combinaisons (également probables) en nombre N tel que son logarithme vulgaire satisfait à la relation

$$\log N = S \log 2$$

Ainsi, dire que le cerveau de notre acteur conserve une information certainement très supérieure à 54 millions de bits, c'est dire que les configurations moléculaires mises en jeu dans son cerveau doivent offrir des combinaisons en nombre certainement très supérieur à un nombre dont le logarithme est égal à $0,162 \times 10^8$.

La grandeur d'un pareil nombre n'interdit pas qu'il puisse s'inscrire dans les configurations moléculaires d'un cerveau. Prenons une hypothèse quelconque : par exemple celle de Quastler sur la conservation de l'information dans l'œuf fécond. Il suppose que l'information peut être conservée dans les permutations que peuvent former les amino-acides alignés en chaînes hélicoïdales dans les macromolécules protéiniques. On pourrait concevoir bien d'autres hypothèses pour le cerveau, mais puisque celle-ci existe, essayons de l'appliquer. Le poids moléculaire d'une macromolécule est en moyenne de 100.000 environ, celui d'un amino-acide est en moyenne d'environ 100. Il y a donc 1.000 molécules d'acides aminés dans une macromolécule. Si les types d'acides aminés sont au nombre de 10 (en fait, il y en a davantage), cela représente un nombre de combinaisons possibles dont le logarithme est égal à 1.000. Et s'il y a un milliard de molécules par neurone et 10 milliards de neurones dans le cerveau, on peut concevoir des combinaisons possibles, dont le nombre a pour logarithme 10^{22} . Ainsi, la structure du cerveau permet des combinaisons en nombre suffisant pour rendre possible la conservation de l'information, parce que le nombre de ces combinaisons autorisées par la structure cérébrale est *immense*, comme est *immense* le nombre des combinaisons dont la possibilité est exigée par l'information qui s'exprime dans un comportement humain.

Il convient de souligner cette notion (due à Boltzmann) de nombre *immense*. La numération des objets mène à la considération des nombres *très grands*. Mille milliards (nombre utilisé par les financiers) a pour logarithme 12. Le nombre total des atomes contenus dans tout l'univers a un logarithme qui n'atteint pas 80. Ce sont là des nombres *très grands*, mais qui ne peuvent pas être comparés aux nombres *immenses*, lesquels expriment non pas le nombre des objets, mais le nombre des combinaisons réalisables en partant de ces objets, et dont le logarithme (au lieu d'être inférieur à 100 comme c'est le cas pour les nombres très grands) est lui-même un nombre très grand.

Or, bien qu'étant supposé ne pas être embarrassé par les difficultés morales de l'expérience, l'observateur de Laplace n'aurait au plus à sa disposition que les trois milliards de cerveaux présents sur la terre ; un nombre dont le logarithme est inférieur à 10, c'est-à-dire seulement un nombre *très grand* et encore, pas très grand parmi les très grands.

Pour étudier la répartition statistique du nombre *immense* de combinaisons supposé par l'information qui s'exprime dans le com-

portement humain (le logarithme de ce nombre était chez notre comédien sûrement bien supérieur à cent millions), il faudrait que l'observateur de Laplace eût à sa disposition un nombre de cerveaux très supérieur à celui des combinaisons possibles. Un dé offre six combinaisons possibles ; pour savoir s'il n'est pas frauduleusement lesté, c'est-à-dire pour étudier la répartition statistique des six combinaisons, il faut lancer le dé plusieurs centaines de fois. Il ne serait pas raisonnable de conclure après avoir lancé le dé deux fois. Mais il serait énormément plus déraisonnable encore de vouloir étudier statistiquement les combinaisons en nombre immense impliquées par l'information qui s'exprime dans le comportement humain alors que les cerveaux existant réellement ne sont qu'en nombre très grand.

Il n'est pas possible d'étudier la distribution d'un nombre immense de combinaisons si l'on ne dispose que d'un nombre très grand d'individus. C'est là le *principe des classes finies*, dégagé par Elsasser, et qui est d'une application très générale en biologie. En mathématiques, le raisonnement à l'infini est délicat, mais licite. En biologie, on n'a pas le droit, même en théorie, de poursuivre un raisonnement à l'infini. Cela signifie peut-être une impossibilité intrinsèque à déduire la biologie de la physique.

Ainsi, l'information *circulante* du cerveau suppose une information *statique*. Cette information statique peut être à support inerte ou à support métabolique. La première hypothèse va contre tout ce que nous savons en matière de neurobiologie. Mais il semble que la seconde hypothèse soit, par nature, inaccessible au contrôle expérimental, et par conséquent dépourvue de sens opérationnel. Si bien que la recherche d'un support inerte reste peut-être encore la voie dans laquelle il semble préférable de s'engager pour avoir des chances d'aboutir à une mise en évidence des engrammes. Faute de quoi, il faudrait admettre que ce problème est un de ceux où l'hypothèse exacte ne pourra jamais qu'être devinée par élimination des contradictoires et non vérifiée directement.

BIBLIOGRAPHIE

- ASHBY, W. R., *Design for a brain*. Londres, Chapman and Hall, 1952.
 BOHR, N., *Atomic theory and the description of nature*. Cambridge University Press, 1934.
 BRAZIER, M. A. B., *Electrical activity of the nervous system*. Londres, Pitman, No date.

- BRILLOUIN, L., *Science and information theory*. New York, Academic Press, 1956.
- CAHN, T., *Machines électroniques et fonction nerveuse supérieure*. Société Moreau de Tours. Séance du 12 avril 1959, compte-rendu polycopié.
- CHERRY, C., *Information theory*. Londres, Butterworth, 1956.
- ELSASSER, W. M., *The physical foundation of biology*. Londres, New York, Paris, Los Angeles, Pergamon Press, 1958.
- JACKSON, W., *Communication theory*. Londres, Butterworth, 1953.
- JEFFRESS, L. A., *Cerebral mechanisms in behavior*. New-York, J. WILEY, 1951.
- JORDAN, P., *La physique et le secret de la vie organique*. Paris, Albin Michel, 1959.
- MARSHALL, J. A., *Neurophysiology*. Oxford, Blackwell, 1959.
- NAYRAC, P., MASSE, L. et DUJARDIN, J., *Modèle électronique de réflexe conditionnel*. Revue Neurologique, 1956, 95, 1, pp. 56-57.
- NAYRAC, P., *Esquisse de la théorie des comportements adaptatifs*. L'évolution psychiatrique (sous presse).
- NEUMANN, (VON) J., *The computer and the brain*. Yale University Press, 1958.
- QUASTLER, H., *Information theory in biology*. Urbana, University of Illinois Press, 1953.
- WALTER, W. G., *Le cerveau vivant*. Neuchâtel, Paris, Delachaux et Niestlé, 1954.
- YOCKEY, H. P., PLATZMAN, R. L., QUASTLER, H., *Information theory in biology*. Londres, New York, Paris, Los Angeles, Pergamon Press, 1958.

Schématisation de la régulation de la pression artérielle

par H. LABORIT,

*Docteur en Médecine,
Chef de la Station de recherches physiobiologiques
de la Marine Nationale, Paris*

La complexité des mécanismes qui assurent une telle régulation doit nous rendre circonspects dans tout essai descriptif. Bien des phénomènes demeurent d'ailleurs encore obscurs ou à l'état d'hypothèses partiellement confirmées. Il en est ainsi, par exemple, pour l'intervention du métabolisme et des échanges ioniques transmembranaires dans le conditionnement du tonus de la fibre vasculaire et myocardique, facteurs sur lesquels nous avons attiré pour la première fois l'attention en 1956 [1,2] et que certains travaux anglo-saxons récents paraissent devoir confirmer [3, 4]. L'intérêt de cette mise au point, dont nous n'ignorons pas les imperfections, réside, à notre avis, dans la possibilité d'intégration dynamique que nous offre la représentation cybernétique et qui permet d'enfermer dans un schéma relativement facile à retenir, d'une part les facteurs essentiels de cette régulation, d'autre part les principales interactions qui les unissent.

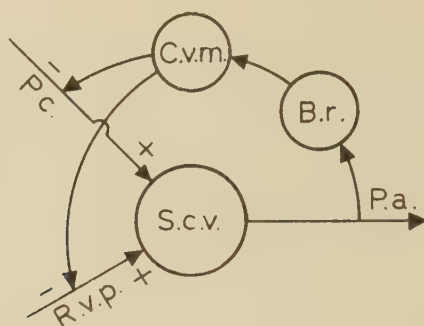
CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

a) Nous n'envisageons, évidemment, que la *régulation physiologique* de la pression artérielle. La physiopathologie, problème aussi vaste mais infiniment plus complexe encore, du fait qu'un même état d'atonie cardio-vasculaire par exemple peut être réalisé, du point de vue cellulaire, par un état de relaxation ou par un état d'épuisement, ne peut être envisagée ici, bien que de nombreuses notions auxquelles nous aurons à faire appel y soient

utilisables. Parler de régulation physiologique, cela veut dire qu'étudiant un effet, la pression artérielle, dont le chiffre se maintient constant autour d'une valeur moyenne, il est nécessaire que les valeurs variables des facteurs qui les commandent demeurent dans certaines limites. Hors de celles-ci, on entre dans la physiopathologie qui entraîne un autre type de régulation, ce que les cybernéticiens appellent un « changement de programme » [5]. Un autre point essentiel à bien comprendre, croyons-nous, est qu'il est fallacieux d'étudier la régulation d'un appareil, quel qu'il soit, isolé de son *contexte organique* et privé de sa finalité au sens cybernétique du mot. Ce qui domine tout le fonctionnement de celui qui nous occupe, c'est justement cette finalité, à savoir le brassage et la mobilisation du liquide extra-cellulaire des cellules vers les émonctoires, poumons et reins. Rôle de mobilisation donc, vers ces éléments producteurs d'électrons et d'ions H^+ que sont les métabolismes cellulaires, de l'oxygène de l'air, leur accepteur privilégié. Rôle de mobilisation de ces ions H^+ et de ces électrons vers les organes chargés de les excréter, poumons et reins. Rôle de mobilisation enfin des substrats alimentaires des organes d'absorption ou de mise en réserve, vers leurs utilisateurs, les cellules.

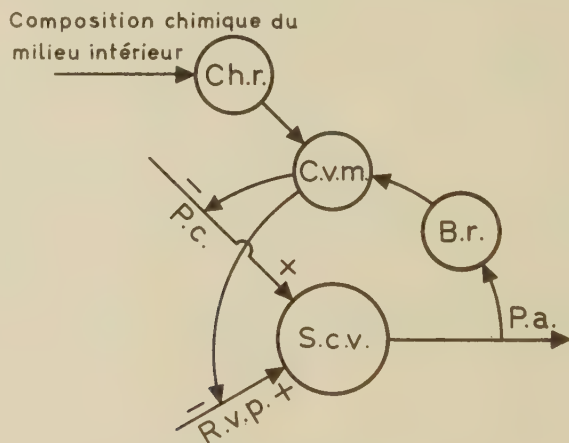
b) La mobilisation des éléments que nous venons d'envisager exige que certaines caractéristiques de la masse circulante soient maintenues. Par ailleurs, la conservation d'une certaine pression de perfusion est nécessaire aux échanges entre le sang et les tissus. Le contenant et le contenu du système cardio-vasculaire doivent donc s'adapter l'un à l'autre constamment. Les variations de volume et de répartition de la masse sanguine ou globulaire, les variations de la viscosité, et de la puissance cardiaque, de la résistance vasculaire périphérique influenceront la valeur de la pression artérielle. Mais la valeur de la pression artérielle par rétroaction (feed-back) influencera les facteurs que nous venons d'énumérer de manière à assurer sa constance comme l'exprime la partie droite de la fig. 3 que nous détaillerons plus loin. La régulation de la pression artérielle répond donc à la description générale des *régulateurs* en ce qui concerne les phénomènes *hémodynamiques* de son conditionnement.

c) Mais la fonction essentielle du système cardio-vasculaire qui réside dans le transport de l'hydrogène à travers l'organisme, rend nécessaire une commande chimique de l'homéostasie circulatoire. Elle est simplifiée dans la partie gauche de la fig. 3 et laisse supposer les corrélations étroites existant entre le fonctionnement



P.c. : Puissance cardiaque.
 R.v.p. : Résistance vasculaire périphérique.
 P.a. : Pression artérielle.
 B.r. : Baro-récepteurs.
 C.v.m. : Centres vaso-moteurs.
 S.c.v. : Système cardio-vasculaire.

FIG. 1. — Principe de la régulation hémodynamique du système cardio-vasculaire (*Régulateur*).



Ch.r. : Chémo-récepteurs.
 P.c. : Puissance cardiaque.
 R.v.p. : Résistance vasculaire périphérique.
 P.a. : Pression artérielle.
 B.r. : Baro-récepteurs.
 C.v.m. : Centres vaso-moteurs.
 S.c.v. : Système cardio-vasculaire.

FIG. 2. — Principe de la régulation avec commande extérieure au système cardio-vasculaire. Cette régulation est commandée par les variations de la composition chimique du milieu intérieur (*Servo-mécanisme*).

circulatoire et ventilatoire d'une part, entre le fonctionnement circulatoire et métabolique (normal ou perturbé) d'autre part.

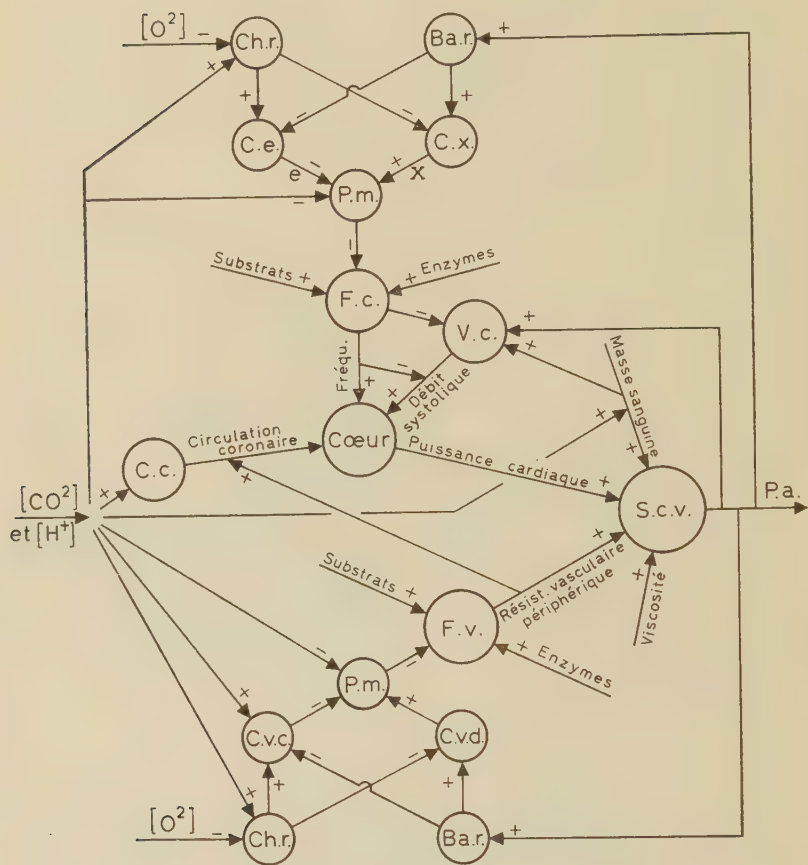
Le *régulateur* précédent devient un *servo-mécanisme* puisque ce dernier se distingue du précédent (comme l'a bien précisé P. de Latil) par ce fait « que la commande vient de l'extérieur du système (le système cardio-vasculaire présentement) pour agir sur la boucle rétro-active » (fig. 1 et 2).

La constance de l'effet (pression artérielle) est garantie par le feed-back contre les variations de ses facteurs (puissance cardiaque, résistance vasculaire, masse sanguine, viscosité). Seulement, comme le maintien de la constance de sa pression artérielle n'est pas pour un organisme une fin en soi, mais le moyen, à l'intérieur de certaines limites d'activité fonctionnelle de ses organes et cellules, de permettre la réalisation de cette activité fonctionnelle, *le système autorégulé précédent demeure sensible à une commande extérieure à son propre système, à savoir les variations de la composition chimique du milieu intérieur. Il devient un servo-mécanisme.*

d) Enfin, ce servo-mécanisme dépend également du fonctionnement du régulateur puisque la composition chimique du sang qui dépend de l'équilibre entre la production et l'excrétion d'ions H^+ en particulier, dépend donc elle-même de la pression de perfusion dans les organes, de la pression artérielle. On passe alors de la *régulation de système* à la *régulation d'organisme*.

LES FACTEURS DE LA PRESSION ARTERIELLE

La fig. 3 construite sur le mode cybernétique (dont nous avons récemment résumé les règles générales) [5] choisit comme effecteur de la pression artérielle (prise pour effet) le système cardio-vasculaire et les principaux facteurs qui classiquement la conditionnent : la puissance cardiaque, la résistance vasculaire périphérique liées au contenant du système, la masse et la viscosité du sang caractérisant le contenu, tous facteurs positifs de la pression artérielle. Ce schéma localise à sa partie supérieure les facteurs cardiaques et à sa partie inférieure les facteurs vasculaires. De même que nous avons réuni, sur la partie gauche, les influences biochimiques sur les systèmes régulateurs, on voit, sur la partie droite, que la valeur de la pression artérielle agit par rétroaction sur une chaîne de préfacteurs dans le détail desquels nous pénétrerons dans un instant. Cette rétroaction représente finalement un feed-back *négatif* sur la puissance cardiaque et la résistance vasculaire. Nous savons qu'une rétroaction négative permet le travail *en constance* d'un effecteur, ce qu'exprimait déjà Morat en disant que « la pression règle la pression ».



- Ch.r. : Chemo-récepteurs.
 P.a. : Pression artérielle.
 Ba.r. : Baro-récepteurs.
 S.c.v. : Système cardio-vasculaire.
 C.e. : Centres sympathiques.
 C.x. : Centre du pneumo-gastrique.
 P.m. : Potentiel de membrane.
 C.v.c. : Centre vaso-constricteur.
 C.v.d. : Centre vaso-dilatateur.
 F.c. : Fibre cardiaque (Tonus).
 V.c. : Volume cardiaque.
 F.v. : Fibre vasculaire (Tonus).

FIG. 3.

IMPORTANCE DU FACTEUR MÉTABOLIQUE DANS LE CONTRÔLE DU TONUS DES FIBRES DU SYSTÈME CARDIO-VASCULAIRE

Il s'agit d'un ensemble de faits sur lesquels les traités classiques insistent peu et qui nous paraissent cependant indispensables à la compréhension des corrélations envisagées. Les fibres musculaires lisses des vaisseaux, de même que les fibres cardiaques, puisqu'elles font partie d'un organisme, verront au même titre que les autres cellules de cet organisme, leur métabolisme, et de ce fait leur tonus, sous la dépendance de l'équilibre physico-chimique du milieu extra-cellulaire, ce milieu extra-cellulaire qu'elles ont pour mission de mobiliser des tissus vers les émonctoires. D'autre part, puisque leur caractéristique principale est représentée par un certain tonus nécessaire à la réalisation de leur fonction mobilisatrice de la masse circulante, il est à prévoir que tous les mécanismes régulateurs nerveux et hormonaux, et que toutes les variations physico-chimiques du milieu intérieur, aboutiront à des variations du tonus de ces fibres. *C'est donc d'abord à l'étage cellulaire des fibres du système cardio-vasculaire que nous devons rechercher la résultante de toutes les fonctions régulatrices de la pression artérielle.* Ceci est exprimé dans la fig. 3 où le cœur et la fibre vasculaire sont pris comme effecteurs respectifs des effets : puissance cardiaque — résistance vasculaire périphérique.

Rappelons brièvement que le tonus d'un élément musculaire dépend de l'état d'association ou de la dissociation de l'actine et de la myosine, elle-même fonction du rapport entre les concentrations ioniques existant à l'intérieur et à l'extérieur de la fibre, rapport qui règle son potentiel de membrane. L'association (contraction) ou la dissociation (relâchement) de l'actine et de la myosine sont donc fonction du rapport des concentrations $\frac{K_i}{K_e}, \frac{H_i}{H_e}, \frac{Na_e}{Na_i}$.

L'élévation du rapport $\frac{K_i}{K_e}$ par exemple favorise la dissociation (relaxation), la variation inverse, l'association (contraction). Nous avons signalé avec P. Huguenard dès 1956 [1, 2] que ces notions permettaient de prévoir et d'interpréter les variations tensionnelles observées en perturbant expérimentalement ces rapports par des facteurs variés. L'adrénaline et la noradrénaline par exemple, augmentent (K_e), diminuent dans la cellule musculaire lisse des vaisseaux (K_i) et augmentent (Na_i) [6, 7, 8]. Or elles accroissent le tonus

vasculaire, provoquant une hypertension. Elles accroissent également le métabolisme général, la libération tissulaire d'ions H^+ . La constance du pH normalement contrôlée par l'hyperventilation peut être perturbée dans ce cas si l'on maintient l'animal en ventilation constante.

Inversement, l'hyperventilation diminue He , s'accompagne d'hypokaliémie (diminution de Ke) et provoque une hypotension. On peut multiplier les exemples. Evidemment, les corrélations sont généralement complexes, car des facteurs comme l'anoxie anoxique ou l'hypercapnie provoquent une acidose (accroissement de He), une libération d'adrénaline, augmentent la kaliémie (Ke), diminuent la natrémie (Nae), excitent les régulations sympathiques en agissant soit directement sur les centres, soit indirectement par voie réflexe. Mais tous les mécanismes aboutissent finalement à diminuer ou augmenter le potentiel de membrane des fibres cardiovasculaires, à augmenter ou diminuer parallèlement leur tonus, du moins, répétons-le, aussi longtemps que nous demeurons dans les limites des régulations physiologiques.

Or, un tronçon d'artère placé en survie dans un liquide de Ringer et correctement oxygéné, conserve longtemps un certain tonus et présente des contractions rythmiques explicables par le mécanisme autorégulé du fonctionnement cellulaire dont nous défendons le principe [9], ce qui nous paraît plus logique que de faire appel à une propriété spéciale et inexpliquée de la fibre musculaire comme le font les partisans de la conception myogène, ou à l'action du système nerveux intramural (conception neurogène) qui n'interviendront pour nous qu'en tant que système régulateur de corrélation.

En effet, il est certain que c'est le *métabolisme cellulaire* qui maintient la différence de concentration ionique entre l'intérieur et l'extérieur de la fibre, comme de tout élément cellulaire [2]. C'est donc lui qui règle le potentiel de membrane et de ce fait fait la perméabilité de celle-ci. Mais la perméabilité réglant l'intensité des échanges donc le métabolisme, on comprend que ces différents éléments varient rythmiquement du seul fait de l'existence dans tout système autorégulé d'un certain intervalle de temps entre la variation de la valeur d'un facteur et sa correction par rétroaction à partir de la variation consécutive de l'effet. Tous les facteurs nerveux, endocriniens, et plus généralement chimiques au niveau de la fibre, influenceront le tonus de base et la rythmicité, permettant la régulation métabolique de tissus ou d'organes (régulations régionales) ou la régulation d'activité de l'organisme entier (réaction au milieu).

Quel que soit le facteur envisagé, il agira dans bien des cas par des mécanismes synergiques à différents niveaux : *directement* sur la fibre lisse (variation du pH, du pO_2 , du pCO_2 , médiateurs chimiques variés de l'influx nerveux, hormones diverses, ions minéraux), *directement* sur les centres vaso-moteurs et indirectement sur la fibre grâce à une médiation chimique ou enfin par *voie réflexe*, *indirectement* sur les centres de la fibre et *directement* sur les zones baro et chemo-sensibles.

RÉGULATION VASCULAIRE

Comme dans tout système autorégulé, il existe un dispositif sensible aux variations de l'effet. Nous venons de voir que c'est la perméabilité ou le potentiel de membrane pour le métabolisme de la fibre. Ce seront les baro-récepteurs pour la pression artérielle (Hering, Heymans, Ladon, Bouckaert). Ces derniers sont capables de réagir sur la résistance vasculaire périphérique et sur la puissance cardiaque selon les variations de la pression artérielle. Comme la puissance cardiaque et la résistance vasculaire sont deux facteurs positifs de la pression artérielle, il est donc nécessaire pour que la valeur de celle-ci reste constante que ses variations agissent sur ses facteurs par rétroaction négative. En d'autres termes, les mécanismes mis en jeu doivent diminuer la résistance vasculaire et la puissance cardiaque quand la pression s'élève, et inversement.

En effet, naissent, au niveau des zones baro-sensibles de la zone cardio-aortique, le nerf dépresseur de Ludwig et de Cyon du sinus carotidien, les nerfs de Hering qui transmettent les excitations dont ils sont l'objet à des centres cérébro-bulbo-médullaires dont les uns, indiscutés, sont vaso-constricteurs, les autres, moins universellement admis, seraient vaso-dilatateurs. Une variation tensionnelle excitant les baro-récepteurs, ceux-ci déclencheront l'excitation (incertaine) des vaso-dilatateurs. Des neurones centraux, les variations d'influx vaso-moteurs aboutiront, après relais ganglionnaires, au niveau de la fibre vasculaire, où l'inhibition ou la libération de sympathie et peut-être la libération ou non d'acétylcholine provoqueront une variation du tonus, dans un sens opposé à celui de la variation tensionnelle primitive. C'est une des causes du retour de la pression artérielle à sa valeur moyenne. La *pression artérielle agit donc sur la résistance vasculaire périphérique par une rétroaction négative* (régulateur).

La commande extérieure du système (servo-mécanisme) qui siège dans les variations chimiques du milieu intérieur possède des récep-

teurs sensibles, les *chemo-récepteurs*, qui siègent dans les zones cardio-aortiques et sino-carotidiennes (Heymans, Bouckaert, Dautrebande). Les modifications de la teneur en O_2 , en CO_2 , les variations du pH, certains agents pharmacodynamiques introduits dans le sang circulant, agiront sur ces zones pour en faire varier l'excitabilité. Elles répercuteront leur excitation ou leur inhibition sur les centres vaso-moteurs cérébro-bulbo-médullaires et de là sur la fibre vasculaire périphérique. Mais la commande extérieure, le chimisme sanguin, agit également directement sur les centres vaso-moteurs.

Enfin, la sécrétion d'adrénaline par la surrénale est commandée par un centre adrénalino-sécréteur qui peut être excité soit par le chimisme sanguin (CO_2 — O_2), soit, à travers un mécanisme réflexe, par les variations de la pression sanguine. Du fait de son rôle secondaire dans la régulation physiologique du tonus artériel, nous ne l'avons pas fait figurer dans la fig. 3, très simplifiée.

La *régulation vaso-motrice tissulaire* fait appel à l'ouverture à la circulation d'un plus ou moins grand nombre d'anses capillaires inactives à l'état de repos. Quand un organe entre en activité, l'accroissement de son métabolisme cellulaire aboutit à la libération de métabolites (CO_2 , ions acides, histamine, etc...) qui relâchent les sphincters précapillaires et ouvrent ainsi de nouvelles anses capillaires à la circulation. Le métabolisme tissulaire règle donc sa circulation propre de façon autonome, autorégulée. Ainsi au cours du travail musculaire, une vaso-dilatation intense au niveau des muscles intéressés apparaît, alors qu'une vaso-contriction compensatrice siège dans d'autres territoires.

Il existe donc des *balancements circulatoires* entre différentes régions de l'organisme permettant à la capacité circulatoire de s'adapter rapidement aux déplacements de la masse sanguine, qui elle varie peu, commandés par les variations d'activité fonctionnelle des organes ou tissus. Ces balancements circulatoires se font à l'intérieur du cadre de la physiologie. Ils sont essentiels à la régulation thermique (vaso-contriction superficielle au froid, vaso-dilatation superficielle au chaud) par exemple. Mais ils constituent également par leur intensité et leur durée anormales le mécanisme primordial des phénomènes physiopathologiques aigus (vaso-contriction splanchnique perturbant le fonctionnement intestinal, hépatique et rénal). Nous limitant à la régulation physiologique, nous n'envisagerons pas cette éventualité ni le rôle des anastomoses artérioveineuses.

D'autre part, il est admis que la *circulation coronaire* répond de

façon inverse aux médiateurs chimiques de l'influx nerveux (vaso-constriction sous l'action du parasympathique et de l'acétylcholine, vaso-dilatation sous celle du sympathique et de l'adrénaline). Nous verrons plus loin que son débit est également réglé par la pression dans l'aorte et qu'il existe donc une interaction étroite entre la circulation périphérique et le travail cardiaque. Le déficit en O_2 , l'accumulation de CO_2 , l'abaissement du pH, provoquent aussi une dilatation coronaire. Celle-ci est favorable à un meilleur approvisionnement du muscle cardiaque, dont le travail s'accroît dans son rôle de pompe, mobilisant les métabolites du fonctionnement tissulaire vers les émonctoires chaque fois qu'apparaît une tendance à l'anoxie, à l'hypercapnie ou à l'acidose.

Quant à la *circulation cérébrale*, malgré des discussions qui durent encore, elle paraît beaucoup plus sensible à l'activité du tissu qu'elle irrigue, de même qu'à l'anoxie, l'hypercapnie et l'acidose qui provoquent à son niveau une vaso-dilatation, qu'aux réflexes à point de départ dans les zones vaso-sensibles qui régissent la motricité des vaisseaux périphériques. Elle demeure cependant sensible aux variations de la pression artérielle générale, sans concourir à cette régulation. Elle en bénéficie en particulier en physiopathologie. D'ailleurs, sans ce comportement apparemment paradoxal des circulations coronaires et cérébrales, la conséquence des réactions organiques aux agressions variées ne serait pas la fuite ou la lutte, et les homéothermes ne bénéficieraient pas de l'indépendance relativement étendue qu'ils possèdent à l'égard du milieu.

RÉGULATION CARDIAQUE

Ce que nous avons écrit plus haut concernant la fibre vasculaire peut à notre avis être intégralement repris en ce qui concerne la fibre cardiaque. Echanges ioniques transmembranaires, potentiel et perméabilité de membrane, métabolisme cardiaque, concourent à l'autorégulation fonctionnelle de la fibre myocardique. La différence essentielle est que le muscle cardiaque, muscle strié spécial dont les fibres sont anastomosées en un réseau syncytial, possède une régulation *d'organe* particulière. Si l'automatisme contractile de la fibre cardiaque isolée répond probablement aux mêmes lois cybernétiques de la physiologie cellulaire que nous avons décrites, ces propriétés paraissent particulièrement développées au niveau de certaines régions (Nœud de Keith et Flack et d'Aschoff-Tawara) à partir desquelles l'excitation se propage le long des faisceaux de conduction (Faisceau de HIS) et diffuse aux ventricules [9].

Le rôle du système nerveux et des facteurs humoraux est réduit dans cette conception [2] à un rôle de régulation d'un processus automatique fondamental.

Pour la fibre cardiaque, les facteurs nerveux d'augmentation ou de diminution du tonus sont beaucoup plus nettement différenciés que pour la fibre vasculaire.

L'excitation du bout périphérique du pneumo-gastrique diminue le tonus myocardique (effet tonotrope négatif), la vitesse de l'onde d'excitation est ralentie (effet dromotrope négatif), les battements cardiaques deviennent moins fréquents (effet chronotrope négatif). L'énergie de la contraction est diminuée (effet inotrope négatif). Le potentiel de membrane est augmenté (Gaskell). Le vague est donc un nerf modérateur du cœur, son médiateur chimique est l'acétylcholine.

L'excitation du bout cardiaque du sympathique cervical possède les effets contraires : tonotrope, dromotrope, chronotrope et inotrope positifs. On peut admettre que c'est en agissant sur les processus métaboliques de la fibre que ces deux nerfs et leurs médiateurs chimiques interfèrent sur son autorégulation. Le centre du pneumo-gastrique est bulbaire. Ceux du sympathique siègent vraisemblablement dans la corne latérale de la moëlle cervico-dorsale.

La mise en jeu de ces centres ne fait pratiquement pas appel à une action directe. Par contre, les mécanismes réflexes sont importants et sont calqués sur ceux décrits pour la régulation vasculaire à partir des zones baro et chemo-sensibles.

En ce qui concerne les variations de pression, même rétroaction négative, l'hypertension excite le centre bulbaire du X et provoque un ralentissement du rythme cardiaque. L'hypotension a une action inverse mais on doit noter que les modifications de la composition chimique du sang sont beaucoup moins réflexogènes pour le cœur qu'elles ne le sont pour le tonus vasculaire. Par contre, leur action directe sur la fibre myocardique est considérable. La conséquence de la mise en jeu de ces différents facteurs, les uns nerveux déclenchés par les variations mêmes de la pression (régulation), les autres chimiques déclenchés par la commande extérieure au système (servo-mécanisme) est en définitive une variation de la polarisation, donc de la perméabilité et du métabolisme de la fibre cardiaque. Il en résultera soit une diminution du tonus myocardique avec ralentissement de la conduction et du rythme, soit au contraire une élévation du tonus, avec accélération de la conduction et augmentation de la fréquence. Ce sont ces facteurs qui régleront la *puissance cardiaque*, facteur positif de la pression artérielle.

En effet, la puissance cardiaque est elle-même fonction de la fréquence des contractions et du débit systolique. Le débit systolique dépend lui-même des pressions artérielle et veineuse par suite de leur répercussion sur la pression intracavitaire, qui commande l'adaptation du volume cardiaque par dilatation diastolique (Starling), du moins dans certaines limites physiologiques où nous prétendons demeurer. Ces limites physiologiques existent également en ce qui concerne la fréquence cardiaque. Au-dessus d'un rythme à 160/mn, le débit cardiaque diminue.

Une interaction réunit souvent ces deux facteurs, de telle sorte qu'avec l'accroissement de la fréquence, la diastole étant plus courte, le cœur a moins de temps pour se remplir et le débit systolique diminue. Il y a encore là une régulation protectrice du cœur.

INTERACTION DE LA REGULATION CARDIAQUE ET DE LA REGULATION VASCULAIRE PAR L'INTERMEDIAIRE DE LA CIRCULATION CORONARIENNE

Les coronaires prenant naissance sur l'aorte en aval des valvules sigmoïdes, leur débit de perfusion sera immédiatement influencé par la pression dans l'aorte et la résistance vasculaire périphérique. Quand la valeur de ce facteur augmente, le débit coronaire augmente également et l'approvisionnement du muscle cardiaque varie ainsi parallèlement au travail qui lui est demandé. Cette notion est importante, surtout en physiopathologie, car lorsque la pression artérielle tombe au-dessous d'un certain niveau (hypotension contrôlée par exemple), la vascularisation myocardique peut devenir insuffisante et une anoxie myocardique en résulte. Il s'agit donc d'une interaction positive entre la résistance vasculaire périphérique et la circulation coronarienne (fig. 3).

FACTEURS METABOLIQUES ET SUBSTRATS

Il va sans dire que le fonctionnement tant cardiaque que vasculaire, puisqu'il dépend du métabolisme des fibres cardiaques et vasculaires, est donc lié au bon fonctionnement des processus enzymatiques de ces fibres et à leur approvisionnement correct en substrats. L'intérêt du glucose et le danger des toxiques cellulaires variés dans le fonctionnement cardio-vasculaire se situe à cet échelon.

MASSE SANGUINE

Il est évident que les modifications de la masse sanguine influencent la valeur de la pression artérielle. Certaines adaptations physiologiques et physiopathologiques de cette masse assureront sa stabilité. Il s'agira d'une part des variations de la diurèse et de la transpiration, des échanges hydriques entre secteur vasculaire et extra-vasculaire, entre secteur extra et intra-cellulaire, etc...

Certains organes réservoirs tels que le foie, la rate et les muscles, mettront en circulation ou retiendront un certain volant sanguin.

Un mécanisme qui nous paraît essentiel et dont les schémas cybernétiques nous ont fait prendre récemment conscience [5], est l'interaction entre la rétention hydrique et le pH du milieu extra-cellulaire. La dilution du L. E. C. paraît en effet un des moyens les plus simples de la régulation de ce dernier. Dans ce mécanisme seront alors impliquées la réabsorption rénale du Na^+ en réponse à l'hypercapnie et la libération d'aldostérone par la surrénale. Nous avons schématisé ce mécanisme par une flèche d'interaction positive entre le facteur extérieur au système (commande du servo-mécanisme) = (CO_2H_2) et la masse sanguine.

Quant à la *viscosité*, à l'état physiologique du moins, ses variations ne paraissent pas suffisamment importantes pour nous arrêter longtemps. Il n'en est pas de même à l'état physiopathologique.

En résumé, (et nous insistons encore une fois sur cette notion qui, non classique, nous paraît cependant essentielle à la compréhension de la régulation circulatoire), il existe deux ordres de faits de signification différente :

a) Une autorégulation de la pression artérielle, régulation de système n'ayant aucune finalité en elle-même, pas plus qu'un régulateur à boules de Watt n'en possède une, pris isolément.

b) Un servo-mécanisme, c'est-à-dire une commande extérieure au système cardio-vasculaire, agissant sur le régulateur précédent, dont la conséquence du fonctionnement est le maintien de la constance des caractéristiques biochimiques du milieu intérieur. Cette constance est en effet nécessaire au maintien de l'organisation cellulaire. C'est une régulation d'organisme.

Ainsi, le système cardio-vasculaire, placé entre la cellule productrice d'ions H^+ et les émonctoires, excréteurs d'ions H^+ , conquiert-il sa véritable finalité. L'un des mérites de la conception cybernétique des régulations aura été certainement (et ce travail nous

en paraît un exemple) d'avoir rendu à la finalité sa signification. L. Couffignal ne définit-il pas la cybernétique « L'art de rendre efficace l'action » ?

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LABORIT, H. et HUGUENARD, P., *Presse méd.*, 1956, n° 26, pp. 605-608.
- [2] LABORIT, H. et HUGUENARD, P., *Jour. de Physiol.*, 1956, n° 48, pp. 871-879.
- [3] SYDNAY, M., FRIEDMAN, Ph. D., JAMES, D., JAMIESON and FRIEDMAN, C. L., *Circulation Research*, 1959, vol. 7, pp. 44-53.
- [4] FRIEDMAN, Ph. D., FRIEDMAN, C. L. and MIYOSHI NAKASHIMA, *Circulation Research*, 1957, vol. 5, n° 3, pp. 261-267.
- [5] LABORIT, H. et WEBER, B., *Presse méd.*, 1958, n° 79, pp. 1779-1781.
- [6] MUIRHEAD, Ernest E., GOTH, Andres and JONES, Frances, *Am. J. Physiol.*, 1954, n° 179, pp. 1-4.
- [7] TOBIAN, L. and FOX, A., *Clin. J., Investig.*, 1956, vol. 35, n° 3, pp. 297-301.
- [8] DANIEL F. E., DAWKINS, O. and JUNT J., *Am. J. of Physiol.*, 1957, vol. 190, n° 1, pp. 67-70.
- [9] LABORIT H., *Thérapie*, 1957, n° 12, pp. 846-852.

Eventual full automation of pipelines

by Newton A. ARMSTRONG,

*Research Manager, Automation Division, Southwestern Industrial
Electronics Co., a division of Dresser Industries, Inc.,
Houston (U.S.A.)*

... Failure to plan ahead and utilize interim control equipment which will fit into effective fully automatic systems is causing major waste in invested equipment and engineering costs in a number of pipeline companies presently involved in increasing the degree of automation in their systems ...

A fully automatic pipeline can be described as one in which all operations except maintenance, repair, and construction are performed by inanimate objects.

The advantages to the operating company of fully automatic operations are as follows :

1. Greater income through :

a) operation at maximum efficiency possible under changing economic, weather and mechanical conditions ;

b) increased throughput.

2. Greater employee efficiency.

3. Greater safety.

4. Improved vigilance in monitoring.

5. Increasing management effectiveness.

To achieve eventual fully automatic operation calls for planning and installing control and communication equipment in such a manner that by gradual expansion full automation can be achieved without replacement or rebuilding equipment used in operations prior to full automation. For this reason, prior to designing, selecting or installing equipment used in manual or semi-automatic control, the system should be studied and the final plan for automation

worked out in some detail. From this plan, design of the interim control equipment should be drawn.

Failure to plan ahead and utilize interim control equipment which will fit into effective fully automatic systems is causing major waste in invested equipment and engineering costs in a number of pipeline companies presently involved in increasing the degree of automation of their systems. Those companies now involved in new construction and replacement of mechanical, control or auxiliary equipment will do well to make the full study of their future plans before investment in equipment which by its design cannot be incorporated into more automatic control systems.

BASIC RULES

A few basic rules apply to the control, data handling and communications equipment and systems used in an automatic pipeline. These rules are based on economic considerations, on the inherent nature of control and communications equipment, the capabilities of digital and analog computers, and gas transmission technology. These rules are :

1. *Make no unnecessary measurements.* For example : omit dial or strip chart indications of automatically controlled conditions and automatic measurement of conditions not needed for control, dispatching, management, legal or economic purposes.
2. *Transmit no information any farther than needed or to any place where it cannot or need not be acted on.*
3. *Make all possible decisions by computers.* Good computing mechanisms, though incapable of real thought, are much closer to being infallible than people in making rapid, correct decisions on information available to them.
4. *Make all automatic decisions at the nearest feasible point to the places where the decisions will be acted upon.* The farther an instruction to a valve or a motor must be transmitted, for example, the greater the expense, and the lower the reliability.
5. *Consider the costs of all components of various proposed automatic systems before deciding between them, rather than mere piecemeal consideration of parts.* A particular type of data transmitter may be cheaper than another, but study may show that use of the first requires leasing extra telephone channels at excessive expense.
6. *Don't duplicate equipment which performs the same physical function for different purposes.* Gas flow data at a certain point in a

pipeline may be needed for billing, for control of a compressor, and to learn of a developing surge condition. Don't install three different flow measuring devices for each of these three purposes ; use the same one three ways.

7. *Utilize the highest reliability equipment possible when it is directly involved in safety considerations, custody transfer and control.* Utilize less reliable equipment, when cheaper, where the device is only " for the record " or has less essential functions.

8. *Take measurements only as accurately as required by their use.* Each decimal point of measurement accuracy multiplies equipment cost.

9. *Consult with engineers versed in communications, computers and control systems when deciding what to buy.* They will save you money.

THE ULTIMATE SYSTEM

In planning the ultimate fully automatic pipeline the major power equipment must be considered. Reliable compressors are required regardless of the degree of automation. Selection of this equipment, other than from a standpoint of even greater demand for dependability is not a matter of consideration from a control system point of view. All types of compressors can be controlled effectively.

Valves must be selected for compatibility with the control system. In addition to being required to perform their function effectively, they should require minimal maintenance, and be capable of adjustment at appropriate speed, and of holding adjustment.

The major equipment types required specifically for automatic operation are measurement devices, communications, equipment, computing and data handling equipment and actuating devices for valves, compressor motors, etc... It is in the system design, governing the selection and utilization of these, that the gains from automation are achieved ; and it is this equipment which represents the great share of the cost of automatic control installation.

A great body of knowledge of communications systems engineering exists in various phases of the electronic industries. The proper application of this communications engineering to the pipeline will result in increased profits. Haphazard purchase of ill-assorted control and data transmission devices will result only in waste.

GENERAL PIPELINE COMPUTER

In operating a pipeline, the ideal condition would be to buy a steady supply of gas from one producer at a single inlet and pump it at a steady rate, the highest possible with safety, to a single sales point where all which is delivered will be bought at a high price. Since this ideal cannot be achieved, and since actual operating conditions contain many inter-related variables, a special purpose computer is needed to resolve these variables, and from their solution to direct the behavior of all controllable portions of the pipeline, to produce instantaneous to continuous optimum use of all facilities.

The main reason for making a pipeline fully automatic is to run the line continuously as close as is physically possible to this ideal condition, in spite of weather, fluctuating demands, equipment breakdown and government regulation. It will help the pipeline company avoid paying for contracted gas that it cannot transmit. It will help insure that extra supplies are present at the delivery points to meet increased demands, and prevent oversupply when sudden warm spells arrive. It will insure that the lowest cost combination of low priced gas from a distant field and higher priced gas from a nearby field are purchased.

For making the major decisions necessary for such gain, a general pipeline computer is required. This computer receives information both manually and automatically. Manual information consists of items which cannot be measured and introduced automatically. It may include weather forecasts, rate changes, new sales contracts and constant pipeline characteristics. Automatically introduced information may consist of instantaneous flow rates at sales points and at entry points from branch gathering systems into main lines ; flow rate at all main line compressor stations ; maximum flow from all branch gathering lines and other limiting factors.

As this general pipeline computer has all necessary information, it should also perform all billing automatically.

COMPRESSOR STATION COMPUTING CONTROLLER

From the standpoint of the over-all system, the compressor station is a device for controlling gas flow : some of the variable information needed at the location of a general pipeline computer about a given compressor station is the instantaneous flow rate from the station ; its maximum flow capacity, as continuously corrected in

consideration of breakdown, wear, etc... ; its consumption of gas ; its trouble condition and its impending breakdown. These items of information should be transmitted very frequently to the general pipeline computer. The general pipeline computer should establish the desired flow rate for each main line compressor station, subject to current physical limitations. Flow rate reset commands to include rate to be reset to, and time in which reset is to be accomplished should be sent to the compressor station in accord with the decisions of the general pipeline computer.

Additional information about the compressor station is needed by the maintenance crew stationed nearest the compressor station. Trouble signals should be capable of being sent automatically to the nearest maintenance station. These are :

1. Equipment failure has occurred not requiring shutdown.
2. Equipment failure has occurred which required shutdown and shutdown has occurred. Restart should not be done until repair has been made.
3. Equipment failure has occurred which resulted in shutdown. Compressor can be restarted safely without repair.
4. Disaster has occurred.

The nearest maintenance crew should be capable of sending signals to the compressor station causing either start or stop.

No other information should be transmitted to or from the compressor station and the nearest maintenance crew.

Within the compressor station considerable information is generated which must be acted upon.

First is the flow rate. This may be determined by measuring the static and differential pressures and temperatures at an orifice plate. In this case the desired information is flow rate. Only flow rate information should be transmitted, not orifice pressures. Numerous operating conditions must be measured, such as pressures, temperatures, conditions indicating fire, etc... These conditions may require action by maintenance crews. If the conditions are correct, they should not be transmitted. If they are incorrect the appropriate one of the four trouble signals should be sent to the maintenance crew.

Some of these items as well as other must be measured to determine timing of various actions during start cycle. These need not be transmitted at all, as they require only local action.

For these functions at each compressor station a number of measuring devices must be installed in the equipment. The signals

generated by these devices should be applied to a compressor station computer.

The compressor station computer should be capable, on the basis of these measurements, to transmit trouble signals, flow rates, and maximum flow rates ; it should also maintain adjustment of compressor speeds, and valve settings to maintain flow rate, discharge pressure and other control settings as directed. It should also cycle start of the compressor on demand and stop the compressor either on demand, or when troubles develop requiring shutdown.

As part of the compressor station computer a data display should be provided, by which the maintenance men can read any measurement desired when they visit the station. In the interests of economy this should be a single display which can be switched at will to the desired measurement.

SUBSTATIONS COMPUTERS

In many pipeline systems it is desirable to treat a whole lease, lease block or gathering system as a single unit in the over-all system. Conditions in which this should be considered are when such a group is relatively compact, but at considerable distance from other installations, when there is common ownership and contractual relationships, or when the overall system is extremely complex with numerous gathering points and feeder line. In such cases substation computers should be used. These transmit to the general pipeline computer total flow rate and maximum total flow rate. They should receive commands from the general pipeline computers setting the total unit flow rate.

They should issue commands to well head compressor stations and well head flow controllers, establishing individual flow rates. They should compute these commands from data on contracts, allowables, individual shutdowns, etc... to produce the optimum flow pattern.

TRANSMISSION OF DATA

In a widespread pipeline system, the actual communication channels can represent the most expensive portion of an entire automatic system. We mentioned this as one of the reasons for transmitting no unnecessary information. Only a set amount of information can be transmitted over a given communication channel.

In addition to being expensive, communication channels may be very difficult to install and maintain.

In general, two transmission media are practical. These are radio, including microwave, and wire. Radio channels other than microwave are not readily available.

Transmission characteristics, of wire and microwave channels, in the over-all, are comparable.

For long distance point-to-point communication microwave equipment is, in general, cheaper than wire. For short distances wire is usually cheaper than microwave. Microwave requires expensive transmission and receiving equipment even for short distance. Wire cost is proportional, in general, to distance.

...In some cases, such as offshore and in very difficult terrain, wire is very difficult and expensive to install, even for short distances.

In many situations, telephone, telegraph, or low speed control channels may be leased from utility companies. In other cases, particularly in gathering systems, public communications are not available.

Where the pipeline company must provide its own communication channels, only a very careful study will show the most economical combination of channels to install.

Regardless of the communication channels available, transmission will not be perfect. Noise will always be present in some degree.

As no information in a proper system is sent which is nonessential, it is imperative that all information is received as it is transmitted. To insure this a number of measures are required. These are :

1. Use only the most reliable transmission and receiving components. For these, static magnetic and semiconductor elements are recommended.
2. Transmit all information in digital form.
3. Utilize check coding of all transmitted data to screen out noise.
4. Hold all information which is transmitted until the receiving equipment has checked for valid reception.

These four items are expensive in equipment. Elimination of one or more of these will reduce equipment investment, but will result in failure of the entire systems to perform correctly.

MEASUREMENT DEVICES

Measurement required reduce almost entirely to temperatures, pressures, and rotary motion speeds.

Many devices are available for all of these. They may be based on variable resistance devices, differential expansion, variable inductance, variable capacitances, vibration frequency variation, piezoelectric effect and many others. Improvements are being made continually.

Regardless of the types of pickups used they should have certain characteristics. These are :

1. Drift free.
2. Large signal variation over the range of interest.
3. Rugged.
4. Corrosive resistant.
5. Temperature insensitive (except for temperature devices).
6. Maintenance free.

POWER

Power is required for computation, transmission and actuating valves. In some cases service power is available. Where electric power is not available it can be supplied from either throwaway or rechargeable batteries, or from gas powered generators.

Where electric power is not available it is generally more economical to use gas power for valve actuation and utilize low power batteries for communication and computation.

Gas powered actuators are slower in response than electric and in some cases may become clogged rapidly by chemicals carried by the gas. This is not usually critical, however, and will not usually outweigh the cost of electric power generating equipment.

APPROACHING COMPLETE AUTOMATION

If eventual completely automatic control is contemplated, plans for this should be made at the earliest possible time.

First the eventual system should be studied and laid out in considerable detail.

Equipment for manual and semi-automatic equipment should be selected which will be usable in the ultimate completely automatic system.

Sequence of automating.

1. Manual.

The first equipment to be installed for eventual automation is that which is necessary for manual control. This consists of the measurement devices, and start-stop equipment at the compressor stations and the valves.

The measurement equipment should include the same rugged, nodrift, corrosion-resistant, high signal electrical measurement devices which will be used in the fully automatic system.

All should use the same type signal, for example, voltage-amplitude. All should operate on the same type power supply, if any. Lead wires from these should terminate at one point where the signals are converted to digital form; if they are not already digital.

The signals from all measurement devices should be made capable of being switched by manual controlled electronic switches into a solid state storage unit. The solid state storage unit should be connected to a digital display.

Manually controlled solid state switches should be provided to permit manual start cycling.

Flow controllers should operate on actual flow rate, either computed with orifice computers or other actual flow measurement devices, rather than on simple differential pressure.

These measures would permit manual operation and switchover to more automatic system with no wasted equipment.

The essential points here are that actual flow rate be measured, that equipment be reliable, that information be handled in digital form, and that control be exercised with solid state switching devices. This will permit the reliability and high speed response necessary for eventual fully automatic operation.

2. Semi-automatic.

The second stage is to operate automatic start sequencing, flow rate control and trouble signalling of the compressor stations.

This involves the addition of a sequence controller which receives the starting information in proper order and causes the next step to occur. As it receives all operating information, it will cause one of four trouble signals to be displayed on a panel when necessary.

This unit will also contain a manual setting for flow rate and will continuously compare the actual flow rate with the setting, and adjust flow rate to follow the setting.

3. *Remote setting automatic.*

The next step is to attach a telemetering unit to the solid state controller.

This unit reads the information stored in the controller on demand, converts it to coded information and transmits it.

At this time the information may be transmitted only to the maintenance station and relayed; or trouble information only may be sent to the maintenance station, and the flow rate and maximum flow rate to a central dispatching office.

In either case a telemetering unit must be installed at the receiving point. This will be capable of transmitting signals to all compressor stations to which it is connected, calling for flow rates as desired and setting flow rate. These units will receive and display the four trouble signals. Whichever one receives data will contain means for automatic query of the compressor stations in a regular cycle, and printing out the data received.

4. *Fully automatic.*

The final stage is fully automatic.

By the time a system is to be made fully automatic, all local measurement points in compressor stations should be operating on an automatic basis with remote reset. Trouble conditions should be known by remote indication to maintenance crews. All information necessary for general control of the system should be telemetered automatically to a general dispatching office. Means for remotely causing reset of all control variables should also be available at the general dispatching office.

At this time the general pipeline computer should be directly connected to all telemetering terminals at the general dispatching office. The general pipeline computer from this time will take over over-all control of the system. Information which is not automatically available to the general pipeline computer through its telemetering links will be manually introduced. This type of information includes such things as weather forecasts, expected market fluctuations, new contractual relationships, etc...

The general pipeline computer solving all system variables simultaneously will produce instantaneously and continuously those settings of all variable elements which will cause the system to behave in detail in such a way as to create the best profit situation which available information will permit.

The general pipeline computer used with a given system should be specifically designed for the solution of the equations describing the particular pipeline system with which it is to be used. It is in arriving at the design of this computer that a thorough analysis of the system will be utilized.

CYBERNETICA (Namur)
Vol II — N° 4 — 1959